



# From predators trajectories to preys maps: spatial estimation of purse-seiners activity and tuna in the Indian Ocean

Emily Walker

## ► To cite this version:

Emily Walker. From predators trajectories to preys maps: spatial estimation of purse-seiners activity and tuna in the Indian Ocean. Environmental Sciences. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2010. English. NNT : 2010ENMP0013 . pastel-00552183

**HAL Id: pastel-00552183**

**<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00552183>**

Submitted on 5 Jan 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Doctorat ParisTech**  
**THÈSE**

**pour obtenir le grade de docteur délivré par**

**l'École nationale supérieure des mines de Paris**  
Spécialité "Géostatistique"

*présentée et soutenue publiquement par*

**Emily WALKER**

le 29 juin 2010

## De la trajectoire des prédateurs à la cartographie de leurs proies

## Estimation spatiale de l'activité des senneurs et des thonidés dans l'Océan Indien.

Directeur de thèse : **Jacques RIVOIRARD**

Co-encadrement de la thèse : **Nicolas BEZ**

## Jury

**M. Jean-Noël BACRO**, Professeur, Université Montpellier 2  
**M. Simon BENHAMOU**, Directeur de Recherche, CEFE, CNRS  
**M. Nicolas BEZ**, CR1, UMR 212 EME, IRD  
**M. Daniel GAERTNER**, CR1, UMR 212 EME, IRD  
**M. Philippe GASPARD**, MEMMS, CLS  
**Mme Stéphanie MAHEVAS**, Cadre de Recherche, IFREMER  
**M. Jacques RIVOIRARD**, Maître de Recherche, CG, ENSMP

## Rapporteur

Examineur  
Codirecteur de thèse  
Examineur  
Examineur  
Rapporteur  
Directeur de thèse

# THESE

**MINES ParisTech**  
**Géosciences**

35, rue Saint-Honoré  
77305 Fontainebleau - France



## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier vivement Nicolas Bez pour m'avoir accordé sa confiance tout au long de cette thèse, d'avoir pris autant de temps pour me conseiller, de m'avoir guidé dans mes choix et d'avoir toujours tout fait ces trois années se déroulent le mieux possible : Merci !

Tu as, je pense, parfaitement suivi les recommandations du fameux « Guide du Bon Encadrant de thèse » édition spéciale de 2006 (mise à part sa tentative de se débarrasser de moi en m'envoyant en croisière au large des côtes somaliennes) !

Je remercie Jacques Rivoirard pour ses bons conseils et sa disponibilité du début à la fin de cette thèse, et d'avoir fait le pont entre Sète et Fontainebleau.

Je remercie Philippe Gaspar pour son soutien et la liberté de choix des orientations de ce travail de thèse.

Je remercie Daniel Gaertner et Renaud Pianet pour les réponses à mes nombreuses sollicitations sur la pêche thonière tropicale et pour ne pas m'avoir laissé dormir sous les ponts islandais !

Je remercie Stéphanie Mahévas et Jean-Noël Bacro d'avoir porté un regard critique sur ce travail, ainsi que Simon Benhamou d'avoir présidé le jury de soutenance.

Je remercie l'ensemble des personnes du CRH et du LER pour leur bonne humeur quotidienne, les repas de Noël et autres sardinades ! Je remercie particulièrement Jean-Marc Fromentin et Fred Ménard pour les chocolats de 17h, Laurent Dagorn, François Le Loc'h, Sophie Bertrand (depuis le Pérou), Pierre Lopez, Yann Tremblay, et Gildas Le Corre pour leurs conseils. Je tiens aussi à remercier Peggy Bretaudeau, Pascal Cauquil, et Julien Barde pour les coups de pouce (indispensables !) en informatique.

A l'Ecole des Mines, je remercie l'équipe Géostatistique de m'avoir accueillie, avec une mention spéciale pour Didier Renard pour sa réactivité, ainsi que Nathalie Dietrich, Isabelle Schmitt, et Dominique Vassiliadis toujours disponibles pour faciliter les démarches administratives.

Je remercie le « Groupe Spatial et Bayésien » pour m'avoir démontré que les statistiques sont appliquées plus rigoureusement dans des endroits agréables et avec une ambiance conviviale (à quand le Niolon II « Trajectoires » ?) : merci donc à Eric Parent, Pascal Monestiez, Liliane Bel, Christian



Lantuéjoul, Jean-Noël Bacro, Joël Chadoeuf, Marie-Pierre Etienne, Etienne Rivot, Fred Mortier, André Kretschmar, Fred Fabre... pour n'en citer que quelques-uns !

J'ai pu compter les thons et rentrer aux Seychelles sans encombre grâce à Patrick Drévillon et aux marins de l'Avel Vad : je les remercie. Et merci à Aude Relot pour la logistique !

Je remercie Pascal Monestiez et l'équipe BioSP de l'INRA d'Avignon de m'avoir accueillie, encouragée et soutenue pendant le bouclage final de cette thèse.

Un grand merci à tous les jeunes-thésards, thésards-affirmés et ex-thésards-nouveaux-docteurs que j'ai croisés sur mon bout de chemin de thèse, et avec qui j'ai partagé les rigolades et les galères : Ana Corbineau, Emilie Tew Kai, Morgane Travers, Marie Morfin, Maximilien Simon, Philippe Sabarros, Thomas Fauvel, Elodie Alet, Vera Georgescu, Jimmy Garnier, Karen Nieto, Tristan Rouyer, Timothée Brochier, Sibylle Dueri, Justin Amandè, Céline Artero, Rémi Vergnon, et Marianne Robert.

Enfin, cette thèse n'aurait pas été possible sans le soutien indéfectible de mes parents et de Yoan : Merci !

## TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS .....	1
GLOSSAIRE .....	3
<b>CHAPITRE 1 .....</b>	<b>7</b>
<b>Contexte : pourquoi étudier l'effort de pêche des thoniers senneurs ? .....</b>	<b>7</b>
Partie 1. Les thons tropicaux dans le bassin océanique de l'Océan Indien.....	8
a) Les espèces de thon tropical.....	8
b) Les Dispositifs de Concentration de Poisson (DCP).....	10
c) Le bassin océanique de l'Océan Indien (courants, moussons).....	12
d) L'influence des phénomènes climatiques sur les facteurs environnementaux affectant la pêche .....	13
Partie 2. Exploitation du thon dans l'Océan Indien .....	14
a) Historique de l'exploitation thonière par différentes flottilles .....	14
b) Exploitation par les thoniers senneurs océaniques (français et espagnols).....	16
Partie 3. Problématique de la thèse.....	19
a) Estimation d'abondance des stocks exploités .....	19
b) Evaluation des stocks de thon tropical .....	22
c) Méthodes de statistiques spatiales appliquées à l'halieutique.....	24
d) Objectifs de la thèse et méthodologie mise en œuvre .....	26
<b>CHAPITRE 2.....</b>	<b>27</b>
<b>La pêche thonière tropicale à la senne : analyses préliminaires des données.....</b>	<b>27</b>
Partie 1. Historique de l'exploitation des thoniers senneurs européens.....	28
a) Collecte des données de livre de bord (logbooks).....	28
b) Calées sur bancs libres et calées sous DCP à partir des livres de bord .....	29
c) Saisonnalité de l'activité de pêche .....	31
d) Séries temporelles des efforts de pêche .....	32
Partie 2. Tactiques de pêche (données « observateurs ») .....	36
a) Collecte des données Observateurs .....	36
b) Déroulement d'un coup de senne : étapes d'une calée moyenne d'un thonier senneur français dans l'Océan Indien .....	37
c) Analyse exploratoire des données .....	40
d) Relation durée de la calée / capture .....	46
Partie 3. Analyse descriptive des trajectoires de navires (données VMS).....	52
a) La collecte des données Vessel Monitoring Systems (VMS) .....	52
b) Le pré-traitement des données .....	53
c) Analyse exploratoire des données .....	55

<b>CHAPITRE 3 .....</b>	<b>63</b>
<b>Application et validation, par les données Observateurs, d'un modèle bayésien à états markoviens cachés aux trajectoires de navires de pêche (VMS) .....</b>	<b>63</b>
RESUME du chapitre 3 .....	64
A pioneer validation of a state space model of vessel trajectories (VMS) with observers data ...	67
ABSTRACT .....	67
INTRODUCTION.....	68
MATERIAL .....	69
METHOD.....	71
RESULTS .....	74
DISCUSSION .....	75
BIBLIOGRAPHY .....	78
FIGURES .....	83
 <b>CHAPITRE 4 .....</b>	 <b>95</b>
<b>Activités des senneurs français tropicaux et cartographie de la probabilité de présence de thon .....</b>	<b>95</b>
RESUME du Chapitre 4 .....	96
From predators' tracks to preys' maps: To map the probability of tuna presence from Vessel Monitoring Systems trajectories. ....	97
a) Abstract .....	97
b) Material and Method.....	98
c) Results .....	102
d) Discussion .....	112
 DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSIONS.....	 115
 BIBLIOGRAPHIE .....	 121
 ANNEXES .....	 133
Annexe 1 : Article publié avec comité de lecture Geostats 2008.....	133
Annexe 2 : Note publiée ICCAT 2009 .....	133
Annexe 3 : Code R/BUGS .....	133
Annexe 4 : Atlas des cartes de VMS de thoniers senneurs français des cartes effort/pêche par pixels .....	133
Annexe 5 : Atlas des cartes de proxy de présence de thon.....	133

## TABLES DES FIGURES

*Page de couverture : photo sous-marine – copyright FADIO / IRD-Ifremer / M. Taquet.*

<i>Fig. 1 : Albacore (Thunnus albacares), listao (Katsuwonus pelamis) et patudo (Thunnus obesus). Source : Opic.....</i>	<i>8</i>
<i>Fig. 2 : Distribution de l'albacore (a), du listao (b) et du patudo (c). Les champs colorés illustrent les captures de cette espèce, tous engins confondus (moyenne 1980-2003). Les isothermes 12°C, 16°C et 18°C représentés par des lignes grises, délimitent l'aire de distribution. Source : Marsac et Fonteneau comm.pers., à partir des données des Commissions Thonières ICCAT, IOTC, WCPFC et IATTC.....</i>	<i>9</i>
<i>Fig. 3 : Banc de thon dans la senne (mélange de listao et de petits albacores).....</i>	<i>11</i>
<i>Fig. 4 : Dispositifs de Concentration de Poisson (DCP) : un radeau, un radeau avec des débris, un radeau balisé, un tronc d'arbre équipé d'une balise. ....</i>	<i>12</i>
<i>Fig. 5 : Courants de surface dans le Nord de l'Océan Indien, à partir de données de bouées dérivantes, pour les mois de janvier et juillet. SEC : courant Sud-équatorial, NEC : courant Nord-équatorial, ECC : contre-courant équatorial, SWMC : courant de la mousson du Sud-Ouest, EAC : courant de l'est de l'Arabie, Somali C : courant de Somalie. Source : "Regional Oceanography : an introduction". Tomczak and Godfrey (1994). ....</i>	<i>12</i>
<i>Fig. 6 : Schéma montrant l'influence de la profondeur de la thermocline sur la capturabilité d'un banc de thon pour la pêche à la palangre et la pêche à la senne. ....</i>	<i>14</i>
<i>Fig. 7 : (a) Captures globales des principales espèces commerciale de thon par engin de pêche (LL : palangriers, PL : canneurs, PS : senneurs, TROLL : ligneurs, OTHER : autres engins (filet à poche, autres sennes, chaluts, madragues). (b) Captures des principales espèces commerciale de thon dans l'Océan Indien en milliers de tonnes (albacore : germon, bigeye tuna : patudo, skipjack tuna : listao, yellowfin tuna : albacore). Source : FAO 2004. Management of tuna fishing capacity: conservation and socio-economics, 2<sup>nd</sup> meeting of the technical advisory committee of the FAO project, March 2004, Madrid, Spain.....</i>	<i>16</i>
<i>Fig. 8 : Zones de pêche de l'Océan Indien. Les six zones principales d'exploitation de l'Ouest de l'Océan Indien sont les zones Nord-équatoriale (1), Ouest Seychelles (2), est Seychelles (3), canal du Mozambique (4), archipel des Chagos (5), Sud Seychelles (6). ....</i>	<i>17</i>
<i>Fig. 9: Livre de bord rempli par le patron du senneur pendant une marée.....</i>	<i>28</i>
<i>Fig. 10: Nombre trimestriel de calées sur DCP/FAD (rouge) et nombre mensuel de calées sur bancs libres/BL (bleu) entre 1982 et 2006. ....</i>	<i>29</i>
<i>Fig. 11 : Moyenne annuelle de la proportion de calées sous DCP par rapport au nombre de calées total.....</i>	<i>30</i>
<i>Fig. 12: Carte du nombre de calées cumulé de 1984 à 2004, dans l'Ouest de l'Océan Indien.....</i>	<i>30</i>
<i>Fig. 13 : Carte des centres de gravité des calées sous DCP de 1984 à 2004, en avril-mai, août-septembre et octobre-novembre, dans l'Ouest de l'Océan Indien. ....</i>	<i>31</i>
<i>Fig. 14 : Evolution des captures (en tonnes) des senneurs français et espagnols confondus, sur bancs libres et sur DCP.....</i>	<i>32</i>
<i>Fig. 15 : Evolution des captures (en tonnes) par mode de pêche, pour la flottille française uniquement. ....</i>	<i>33</i>
<i>Fig. 16 : Evolution du nombre de calées des senneurs français et espagnols confondus, sur bancs libres et sur DCP.....</i>	<i>34</i>



Fig. 17 : Evolution du nombre de calées des senneurs français, selon le mode de pêche (bancs libres ou DCP).....	34
Fig. 18 : Evolution du nombre de jours de mer des senneurs français, selon le mode de pêche (bancs libres ou DCP). ....	35
Fig. 19 : Evolution du nombre de jours de recherche (heures de recherche converties en jour) des senneurs français.....	35
Fig. 20 : Formulaire de route (A) et de pêche (B) remplis par les observateurs scientifiques embarqués. ....	37
Fig. 21 : Déroulement d'un coup de senne avec durée de chaque étape en minutes. Le navire est immobile pendant au moins 1h30. Le salabardage dure un temps variable supplémentaire de l'ordre de 1h pour 100 tonnes pêchées.....	39
Fig. 22: (a) Couverture spatiale de toutes les positions notées par les observateurs, pendant les marées de 2006-2007. Chaque symbole (et couleur) correspond à une marée observée. (b) Positions des calées notées par les observateurs pendant les 19 marées observées de 2006-2007. ....	41
Fig. 23 : Histogramme du nombre de jours par marée avec observateur. ....	42
Fig. 24 : Histogramme du nombre de calées par jour. ....	43
Fig. 25 : Enchaînement des calées au cours de trois exemples de marées. Chaque droite verticale en pointillés représente la limite entre deux jours consécutifs. Les calées positives sont symbolisées par des triangles et les calées nulles par des ronds. Les calées sur bancs libres sont en noir, les calées sur DCP en rouge.....	44
Fig. 26 : Histogramme des heures de début de calées par rapport au lever du soleil (heure égale à zéro), pour les calées sur DCP et les calées sur bancs libres.....	44
Fig. 27 : Histogramme du nombre d'arrêts par jour. ....	45
Fig. 28 : Histogramme de la répartition des activités (pêche, arrêt, recherche, route) notées par les observateurs. ....	46
Fig. 29 : Histogrammes de la durée des calées pour l'ensemble des calées (en gris), pour les calées sur bancs libres (en bleu) et pour les calées sur bancs sous DCP (en vert). La barre verticale noire indique la moyenne des durées. ....	47
Fig. 30 : Histogrammes de la durée des calées nulles pour l'ensemble des calées nulles (en gris), pour les calées nulles sur bancs libres (en bleu) et pour les calées nulles sur bancs sous DCP (en vert). La barre verticale noire indique la moyenne des durées. ....	47
Fig. 31 : Histogrammes de la durée des calées positives pour l'ensemble des calées positives (en gris), pour les calées positives sur bancs libres (en bleu) et pour les calées positives sur bancs sous DCP (en vert). La barre verticale noire indique la moyenne des durées.....	48
Fig. 32 : Histogrammes du tonnage des calées positives pour l'ensemble des calées positives (en gris), pour les calées positives sur bancs libres (en bleu) et pour les calées positives sur bancs sous DCP (en vert). La barre verticale noire indique la moyenne des durées.....	48
Fig. 33 : Nuage de points des durées de calées en fonction des tonnages pour l'ensemble des calées (a), et pour les calées positives seulement (b). Les symboles représentent les différentes marées observées. Les régressions linéaires sont les suivantes : (a) $\text{durée} = 1.83 + 0.01 \cdot \text{tonnage}$ , et (b) $\text{durée} = 1.98 + 0.01 \cdot \text{tonnage}$ .....	49
Fig. 34 : Nuage de points des durées de calées en fonction des tonnages pour les calées sur bancs libres et pour les calées sur DCP. Les symboles représentent les différentes marées observées. Les régressions linéaires sont les suivantes : (a) Bancs Libres : $\text{Durée} = 1.91 + 0.01 \cdot \text{tonnage}$ , et (b) Bancs sous DCP : $\text{Durée} = 2.11 + 0.007 \cdot \text{tonnage}$ .....	50

Fig. 35 : Nuage de points des durées de calées en fonction des tonnages pour les calées sur bancs libres et pour les calées sur DCP, uniquement pour les calées d'une durée inférieure à 3h et demie, et d'un tonnage inférieur à 55 tonnes. Les symboles représentent les différentes marées observées. Les régressions linéaires sont tracées pour (a) les Bancs Libres et (b) les Bancs sous DCP. ....	51
Fig. 36 : Schéma de transmission de la donnée de position GPS (points rouges) par le système VMS. ....	52
Fig. 37 : Histogramme de temps (en minutes) entre acquisitions successives des données VMS d'un navire pendant toute l'année 2006 (71 pas de temps sur 22 462 VMS sont supérieurs à 60 min et n'ont pas été représentés ici) (à g.). Proportion du nombre de données horaires par rapport au nombre de données VMS total, pour chacun des navires (à d.). ....	53
Fig.38 : Deux exemples de cartes de trajectoires de bateaux (trajets de jour, en rouge et de nuit, en bleu).....	54
Fig. 39 : Histogrammes des vitesses et des angles de changement de cap (de jour) sur toute la flottille. ....	55
Fig. 40: Histogramme des indices de rectitude (ratios des distances) (a) et des variances d'angles (b) pour un navire. ....	57
Fig. 41 : Exemples de calcul d'indice de rectitude (ratio de distances) et de variance d'angles. ....	58
Fig. 42 : Courbes de densité des nuages de points entre les variables « vitesse au temps t » et « vitesse au temps t+1 » (a), et les variables « vitesse au temps t » et « vitesse au temps t+5 » (b). ....	59
Fig. 43 : Echantillonnage de la flottille : cartographie du nombre d'heures passées dans chaque cellule 0.25° par 0.25°, pour les mois d'octobre 2006 (a) et d'août 2007 (b). ....	60

## LISTE DES TABLEAUX

Table 1 : Caractéristiques des différentes espèces de thons. Source : Fonteneau et Marsac (IRD-THETIS) .....	10
Table 2 : Type de données halieutiques et échantillonnage de l'espace associé. ....	24
Table 3 : Nombre de jours observés par mois, pour 2006 et 2007. ....	42
Table 4 : Nombre de calées par mode et selon la capture. ....	42
Table 5 : Taux de détection des calées.....	56



## AVANT PROPOS

L'un des enjeux majeurs de l'halieutique est d'évaluer l'abondance des ressources marines, en particulier celle des espèces exploitées par l'homme. Dans un contexte d'effondrement des stocks de certains prédateurs marins, les espèces de thon exploitées par des pêcheries industrielles par exemple, sont particulièrement vulnérables, comme c'est le cas du thon rouge d'atlantique (*Thunnus thynnus*). L'évaluation des stocks de poissons exploités devient ainsi une priorité et requiert des méthodes rigoureuses d'échantillonnage et de quantification de l'abondance. Or, la difficulté récurrente des évaluations halieutiques vient souvent du manque de précision, de la non-exhaustivité de la donnée ou d'un échantillonnage non maîtrisé.

Les pêcheries hauturières sont, en général, des pêcheries industrielles ou semi-industrielles portant sur des espèces pélagiques tels les thons, les poissons porte-épées, les petits poissons pélagiques (hareng, maquereau, anchois, sardine, chinchard). Les zones de pêche étant très étendues et éloignées des côtes, les campagnes scientifiques (chalutages, acoustique, survol aérien par exemple) pour le suivi des stocks exploités sont onéreuses et difficiles à mettre en œuvre. Les seules données disponibles pour le calcul de l'abondance sont ainsi souvent celles fournies par les pêcheurs.

Les espèces de thonidés sont des espèces hautement migratrices qui se déplacent à l'échelle du bassin océanique : la délimitation de la répartition spatiale est donc difficile à établir et le calcul de l'abondance du stock s'en trouve complexifié. Nous nous intéressons dans cette thèse au cas de la pêche thonière tropicale : l'estimation des stocks de thon tropical (*Thunnus albacares*, *thunnus obesus*, *katsuwonus pelamis*) est basée sur les données de pêche, c'est-à-dire un échantillonnage de l'océan qui est non maîtrisé et orienté par les choix des pêcheurs.

Contrairement au calcul d'abondance d'espèces terrestres ou marines côtières, les méthodes d'estimation d'abondance doivent être adaptées aux types de données disponibles. Les données sur les stocks de thons tropicaux fournies par la pêche sont en général les livres de bord remplis par les patrons des thoniers senneurs ou, lorsque des programmes de recherche ou de contrôle des pêches sont mis en place, les données collectées par les observateurs embarqués.

Depuis 2000, l'Union Européenne a imposé le contrôle des navires de pêche d'une longueur supérieure à 24 mètres par l'équipement de « Vessel Monitoring Systems » (VMS), boîtier calculant la position GPS du navire toutes les heures et la transmettant par satellite aux organismes de contrôle. Les données VMS ont ensuite été confiées à certains organismes de recherche (notamment l'IRD) pour répondre à des objectifs scientifiques. Les VMS constituent donc une avancée technologique importante pour obtenir les positions précises des navires de pêche, et ne demande aucune contribution spécifique de la part des pêcheurs. Ce nouveau type de données pourrait donc contribuer à l'estimation de l'abondance du stock de thon tropical grâce à des méthodes statistiques adaptées.

La succession de positions VMS constitue une partie de la trajectoire d'un senneur, que nous nommerons directement « trajectoire VMS ». L'ensemble des données VMS des thoniers senneurs constitue ainsi le résultat du plan d'échantillonnage de la flottille. Il s'agit ensuite de développer une méthodologie permettant l'interprétation des trajectoires en termes d'indice d'abondance.

Actuellement, lorsque l'abondance d'un stock ne peut être mesurée directement (par des campagnes scientifiques), il est courant, en halieutique, de construire des indices d'abondance à partir des données dont on dispose sur le stock. L'évaluation des stocks de thons tropicaux s'effectue par l'estimation d'abondance basée sur la Capture Par Unité d'Effort (CPUE). Il est donc implicite que le rapport des captures sur l'effort de pêche est considéré comme proportionnel à l'abondance réelle du stock.



Dans ce cadre, les VMS seront utiles sur plusieurs plans, car l'ensemble des données collectées pourrait permettre :

- la délimitation spatiale précise de l'échantillonnage des espèces de thon par la flottille de thoniers senneurs français.
- l'amélioration de la définition de l'effort de pêche nominal tel qu'il est actuellement calculé.
- la localisation à fine échelle des espèces de thon tropical, relativement à l'échantillonnage de l'Océan Indien occidental effectué par les thoniers senneurs français.

La problématique générale est ainsi d'améliorer l'estimation des stocks de thons tropicaux grâce aux données VMS collectées sur les thoniers senneurs français basés aux Seychelles. Pour y répondre, plusieurs questions sont soulevées :

Qu'est ce que la donnée VMS ? Comment l'utiliser pour améliorer le calcul de l'effort de pêche ? Comment identifier les actions de pêche (calée) sur les trajectoires de senneurs ? Comment distinguer les calées sur bancs libres des calées sous Dispositifs de Concentration de Poisson (DCP) ? Les données de livres de bord et les données collectées par les observateurs peuvent-elles être utilisées comme connaissance a priori ? Comment l'interprétation des trajectoires VMS en termes d'activités de pêche peut-elle servir pour cartographier l'abondance de thon tropical dans l'Océan Indien ?

L'utilisation de cette donnée de trajectoire pour répondre à la problématique est conditionnée par la mise en œuvre de méthodes de statistique et géostatistique pertinentes.

La thèse s'articulera en quatre chapitres :

- Le premier chapitre permettra d'exposer le contexte général et la problématique de la thèse, et l'importance de l'évaluation du stock de thon.
- Le deuxième chapitre est composé de l'analyse exploratoire des données utilisées dans la suite de la thèse, qui conditionnera le choix de la méthodologie.
- Le troisième chapitre détaillera la mise en œuvre d'un modèle markovien dans un cadre bayésien pour l'interprétation des trajectoires VMS. Ce chapitre a fait l'objet d'une publication en cours de révision.
- Enfin, le quatrième et dernier chapitre apportera plusieurs éléments de réponse quant à l'utilisation des données VMS pour estimer spatialement l'abondance de thon tropical, grâce à la géostatistique. Ce dernier chapitre est rédigé en anglais sous la forme d'un papier scientifique en préparation.

## **GLOSSAIRE**

### **Un *armement***

est l'entreprise gérant les navires, leurs équipements et leur personnel.

### **Une *apparence ou système observé***

est une perception visuelle indiquant une présence avérée ou possible de thons (brisant, sardara, balbaya, groupe d'oiseaux, baleine ...).

### **Un *balbaya***

est la manifestation d'un banc de thon en surface : les thons nagent juste sous la surface mais ne sautent pas.

Un ***biome***, appelé aussi aire biotique, écozone ou écorégion, est un ensemble d'écosystèmes caractéristique d'une aire biogéographique et nommé à partir de la végétation et des espèces animales qui y prédominent et y sont adaptées.

### **Une *calée* ou un *coup de senne***

est une action de pêche, réalisée par un senneur, à l'aide du filet appelé senne.

### **Une *calée positive***

est une calée dans laquelle la quantité de thon capturée est supérieure à zéro, sinon la calée sera dite nulle.

### **La *capacité de pêche***

est un concept qui n'a pas encore été rigoureusement défini et il existe des profondes divergences d'opinion quant à la manière de définir et de mesurer cette capacité. Toutefois, on a retenu comme définition pratique la quantité de poisson pouvant être capturée par une unité de pêche, par exemple un particulier, une communauté, un navire ou une flotte.

### **Les *commissions thonières***

sont des commissions sous-régionales regroupant des scientifiques, des ONG, et des représentants des états membres. Ces commissions ont pour objectif de fournir un avis sur l'état des stocks de thons. Les principales commissions thonières sont la commission du Pacifique occidental et central (WCPFC), la commission de l'Océan Indien (CTOI), la commission internationale pour la conservation des thonidés de l'Atlantique (ICCAT), la commission interaméricaine des thonidés tropicaux (IATTC), la Commission du Pacifique Sud (CPS).

### **Un *Dispositif de Concentration de Poisson ou DCP***

est une épave naturelle ou artificielle (en anglais, FAD : Fishing Aggregating Devices), appelée aussi objet flottant.

### **La *dynamique des populations***

se réfère en général à l'étude de l'abondance d'un stock de poisson et des modalités de son évolution dans le temps.

### **L'*effort de pêche***

représente la quantité de matériel de pêche d'un type donné utilisé pendant une unité de temps donnée, par exemple les heures de pêche à la traîne par jour, le nombre d'hameçons posés par jour ou le nombre de fois qu'une senne a été calée par jour, par exemple.

### **La *flotte ou flottille***

est un terme très utilisé dans ce document pour décrire le nombre total d'unités se livrant à un mode bien défini d'exploitation d'une ressource particulière.

### ***Hauturier***

correspond à la haute mer, par opposition à côtier.

### **Le *livre de bord (ou logbook)***

est un tableau rempli par le patron de pêche tous les jours d'une sortie en mer (marée). Y sont renseignés pour chaque jour : la position du navire (à midi, ou à l'heure d'une des calées du jour), le nombre de calées, leur type (banc libre ou banc associé à un DCP), le tonnage capturé pendant chaque calée, et plusieurs autres caractéristiques de l'environnement de pêche.

### **Une *matte***

est un banc de thon.

### **Une *marée***

est une sortie en mer (le navire est hors du port), qui dure 45 jours au maximum pour les thoniers senneurs étudiés.

### **La *méso-échelle***

est une échelle spatiale comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de kilomètres. Au contraire, la micro-échelle correspond à une échelle inférieure à quelques dizaines de kilomètres, et la macro-échelle à une échelle supérieure à plusieurs centaines de kilomètres.

### **La *mortalité par pêche***

est un terme technique qui décrit la proportion de poissons disponibles ayant été pêchés pendant une petite unité de temps. La mortalité par pêche peut se traduire en un ***taux d'exploitation*** annuel exprimé en pourcentage à partir d'une formule mathématique.

### **La *pêcherie***

désigne la somme de toutes les activités halieutiques portant sur une ressource donnée, par exemple une pêcherie de merlus ou de crevettes. Elle peut également concerner les activités d'un type ou mode d'exploitation unique d'une ressource particulière, par exemple une pêcherie à la senne littorale ou à la traîne. Dans cette thèse, la pêcherie thonière tropicale à la senne correspond aux flottilles de thoniers senneurs français et espagnols.

### **Le *point de référence***

est une valeur calculée selon une procédure scientifique et/ou un modèle convenu qui correspond à un état de la ressource et/ou de la pêcherie et peut servir d'orientation à l'aménagement des pêcheries. Certains points de référence ont un caractère général et peuvent s'appliquer à de nombreux stocks de poisson, tandis que d'autres concernent un stock donné. Il faut distinguer les points de référence cibles et les points de référence limites ou seuils, ces derniers représentant un état de faiblesse du stock à éviter.

### Les *recrues*

dans un stock sont le nouveau groupe d'âge de la population qui entre dans la composante exploitée du stock pour la première fois ou bien de jeunes poissons qui pénètrent en grandissant, ou d'une autre manière, dans cette composante exploitable.

### Les *rejets*

sont les éléments d'un stock de poisson rejetés après capture. On peut normalement s'attendre à ce que la plupart des rejets ne survivent pas.

### Un *sardara* ou *brisant*

est la manifestation d'un banc de thon en surface par des sauts hors de l'eau.

### Le *skiff*

est une petite embarcation puissante, utilisée pour maintenir la senne (filet) à une extrémité pendant que le thonier encercle le banc.

Le *stock* ou les *ressources halieutiques* correspondent aux ressources biologiques composant la communauté ou la population dans laquelle les prises sont prélevées dans le cadre d'une pêcherie. L'expression *stock halieutique* implique généralement que la population concernée est plus ou moins isolée des autres stocks de la même espèce et donc autosuffisante.

Le *taux d'exploitation*, appliqué à un stock de poisson, est la proportion du nombre d'individus ou de biomasse prélevée par pêche. Si la biomasse est de 1000 tonnes et la récolte au long d'une année de 200 tonnes, le taux d'exploitation annuel est de 20%.

### La *thermocline*

est la zone océanique de transition entre la couche supérieure chaude et la couche inférieure froide. La profondeur de mouillage des divers engins de pêche par rapport à la thermocline peut affecter la capturabilité.

### *Thon (albacore, patudo, listao)*

L'albacore (*Thunnus albacares*), le listao (*Katsuwonus pelamis*) et le patudo (*Thunnus obesus*) sont les trois espèces de thon dites « majeures », évoluant dans la zone tropicale et ayant une haute valeur commerciale.

### Le *Vessel Monitoring System (VMS)*

est un équipement transmettant par satellite les positions GPS successives du navire.

N.B. : Source : FAO Directives Techniques pour une Pêche Responsable. Aménagement des Pêcheries 4 Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 1999.  
(<http://www.fao.org/docrep/003/w4230f/w4230f08.htm>)





## ***CHAPITRE 1***

**Contexte : pourquoi étudier l'effort de  
pêche des thoniers senneurs ?**

L'objectif du premier chapitre est de poser la problématique et le contexte de la thèse, ce qui permettra de remettre dans un cadre plus global, les analyses et la méthodologie appliquée aux données de pêche. Ce chapitre est donc axé sur le contexte biologique, environnemental et halieutique de la problématique de la thèse. La première partie portera sur les thonidés ciblés par la pêche, puis la deuxième partie consistera en l'historique de la pêche thonière dans l'Océan Indien et ses principales caractéristiques. Enfin la troisième partie exposera la problématique de quantification de l'abondance et certaines méthodes spatiales déjà mises en œuvre pour l'estimation de l'abondance.

### **Partie 1. Les thons tropicaux dans le bassin océanique de l'Océan Indien**

Il s'agit ici de décrire succinctement les espèces de thonidés ciblées par la flottille de thoniers senneurs tropicaux, à travers certaines de leurs caractéristiques. La biologie de ces espèces ainsi que l'environnement dans lequel elles évoluent, peuvent avoir des incidences sur la pêche, d'où la nécessité de présenter ces composantes de la pêche thonière.

#### **a) Les espèces de thon tropical**

Les principales espèces de thonidés exploitées dans l'Océan Indien sont l'albacore (*Thunnus albacares*), le listao (*Katsuwonus pelamis*), le thon obèse ou patudo (*Thunnus obesus*) et plus rarement, le thon germon (*Thunnus alalunga*). D'autres espèces de thon ne sont pas présentes dans l'Océan Indien- Ouest tropical et, ainsi ne sont pas exploitées par les pêcheries dans cette zone. Nous pouvons citer le thon rouge (*Thunnus thynnus*, présent en Méditerranée et en Atlantique) et le thon rouge du Sud (*Thunnus maccoyii*, présent dans le Pacifique et dans le Sud Est de l'Océan Indien) (Table 1).

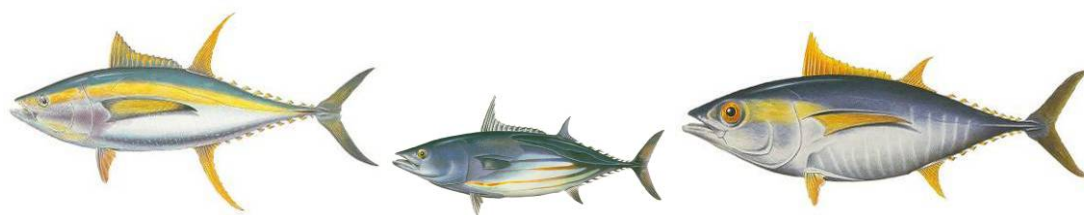


Fig. 1 : Albacore (*Thunnus albacares*), listao (*Katsuwonus pelamis*) et patudo (*Thunnus obesus*). Source : Opic.

Les trois principales espèces de thon tropical, l'albacore, le listao et le patudo (fig. 1) sont présentes dans la zone tropicale des trois océans. La figure 2 montre comment ces espèces se répartissent.

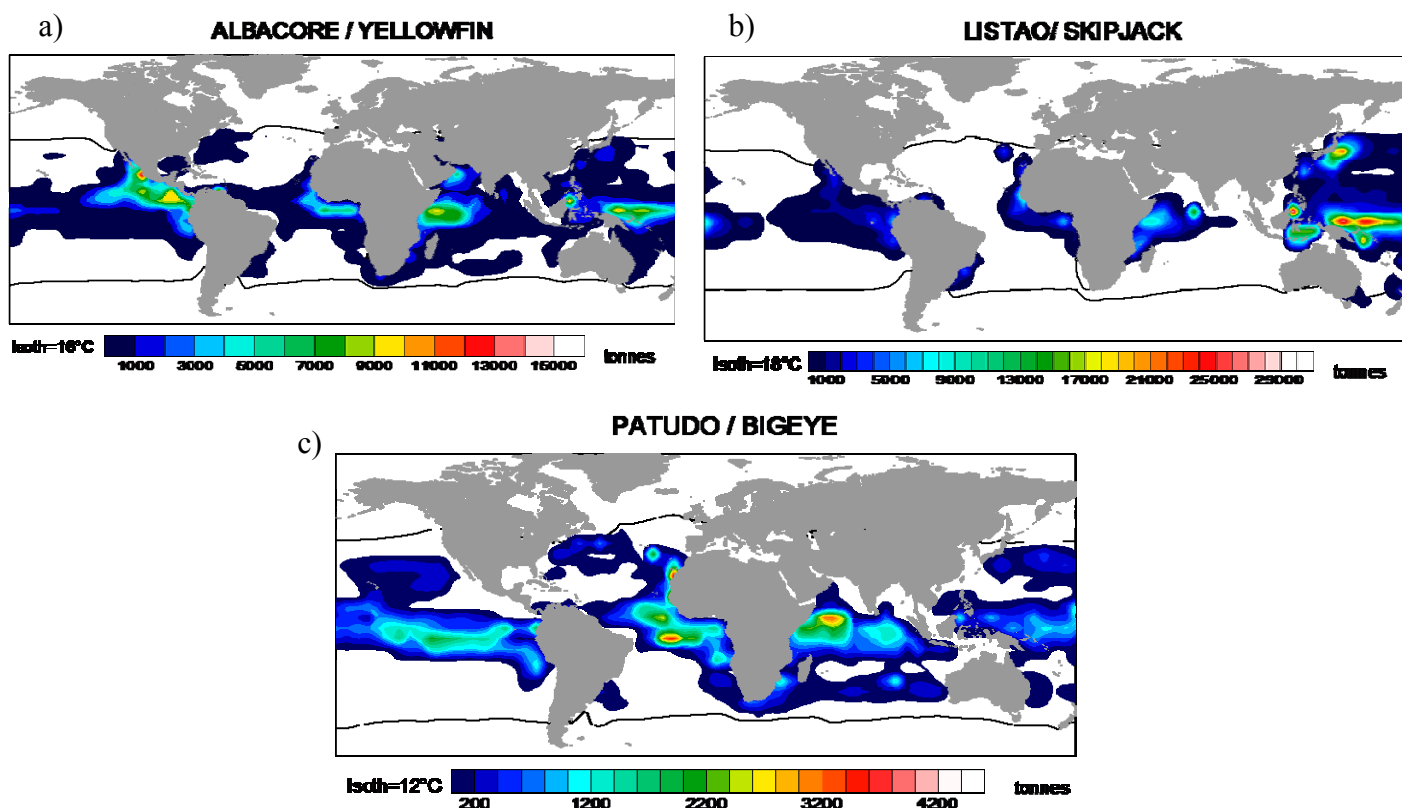


Fig. 2 : Distribution de l'albacore (a), du listao (b) et du patudo (c). Les champs colorés illustrent les captures de cette espèce, tous engins confondus (moyenne 1980-2003). Les isothermes 12°C, 16°C et 18°C représentés par des lignes grises, délimitent l'aire de distribution. Source : Marsac et Fonteneau comm.pers., à partir des données des Commissions Thonnières ICCAT, IOTC, WCPFC et IATTC.

Les thonidés tropicaux sont caractérisés par leur grande taille (Table 1), leur hydrodynamisme performant et leur bonne vision. Ils ont une morphologie leur permettant de nager très rapidement avec des pointes de vitesse de 70 km/h (Block and Stevens, 2001). Ceci explique pourquoi la pêche au thon est parfois comparée à la chasse. Ils disposent d'un métabolisme élevé et d'un système échangeur de chaleur (thermorégulation) qui leur permet de descendre à de grandes profondeurs dans la colonne d'eau (Table 1). Les principales espèces de thon tropical sont de grands prédateurs hautement migrateurs (à l'échelle du bassin océanique), ayant des capacités de déplacement exceptionnelles, horizontalement et verticalement, sur la hauteur de la colonne d'eau (Bard et al., 1998 ; Dagorn et al., 2006 ; Programme de marquage de thon par la commission thonière de l'Océan Indien : <http://www.rttp-io.org>).



## CHAPITRE 1 - Contexte : pourquoi étudier l'effort de pêche des thoniers senneurs ?

Table 1 : Caractéristiques des différentes espèces de thons. Source : Fonteneau et Marsac (IRD-THETIS)

Espèces	Biome (tropical / tempéré)	Poids max Taille max	Longévité	Distrib. Verticale (m)	Age 1 <sup>ère</sup> maturité	Captures mondiales
<b>Listao</b> ( <i>Katsuwonus pelamis</i> )	Trop	10 kg 70 cm	8-10 ans	0 – 100	1.5 an	2 millions t
<b>Albacore</b> ( <i>Thunnus albacares</i> )	Trop	170 kg 2 m	10 -15 ans	0 - 200	3 ans	1.5 million t
<b>Patudo</b> ( <i>Thunnus obesus</i> )	Trop Temp	200 kg 2 – 2.5 m	10-15 ans	0 - 500	3.5 ans	400 000 t
Germon ( <i>Thunnus alalunga</i> )	Temp	60 kg 1.4 m	12-15 ans	0 – 600	4.5 ans	200 000 t
Thon rouge du Nord ( <i>Thunnus thynnus</i> )	Temp	700 kg > 3 m	> 20 ans	0 – 500	4.5 ans	40 000 t
Thon rouge du Sud ( <i>Thunnus maccoyii</i> )	Temp	200 kg > 2 m	40 ans	0 – 300	11 ans	10 000 t

En général pour des raisons de reproduction ou d'alimentation, les thonidés se regroupent en bancs (Bard et al., 1998). La reproduction des thons tropicaux de l'Océan Indien a lieu, selon les auteurs, de décembre à mars (Stequert and Marsac, 1989), ou de janvier à juin (Zhu et al., 2008). Les thons tropicaux se nourrissent de poissons pélagiques ou mésopélagiques concentrés en surface, ainsi que de crustacés et de calmars (Potier et al. 2004, Bard et al., 1998; Roger, 1994, Morfin et al., 2009). Les thons tropicaux sont donc des prédateurs extrêmement bien adaptés au milieu océanique, généralement oligotrophe, où les proies sont souvent rassemblées en essaim (Sabarros et al., 2009).

### b) Les Dispositifs de Concentration de Poisson (DCP)

Les thons ont un comportement grégaire très marqué (fig. 3), et la proximité de nombreux bancs peut former de fortes concentrations, de l'ordre de plusieurs centaines voire des milliers de tonnes (Fonteneau et al., 2008). Ces agrégations de thons en bancs sont nommées « bancs libres ». Ce phénomène d'agrégation a lieu également lorsque des bancs sont observés en association avec des objets flottants, des baleines ou des requins-baleines. Ces bancs sont alors nommés « bancs associés » ou « bancs sous DCP » (Dispositifs de Concentration de Poisson dérivants). Pour des raisons qu'il reste à expliquer, les thons et d'autres poissons pélagiques se concentrent sous n'importe quel objet à la dérive (tronc d'arbre, branchage, cordages, débris divers, ou radeaux construits par les pêcheurs). Certaines études supposent que le phénomène d'agrégation sous les DCP est dû à la rencontre entre les individus pour se nourrir ou se reproduire (« meeting point hypothesis ») (Fréon and Dagorn, 2000, Soria et al., 2009). D'autres études émettent l'hypothèse que les DCP représentent un « piège écologique » dans lequel les thons se retrouvent confinés alors que les conditions environnementales n'y sont pas optimales (Hallier and Gaertner, 2008).



Fig. 3 : Banc de thon dans la senne (mélange de listao et de petits albacores).

### Les Dispositifs de Concentration de Poisson (DCP)

Source : site du projet européen FADIO

Les DCP dérivants peuvent être :

- naturels (algues, branches, débris végétaux...)
- issus de la pollution humaine (planches, morceaux d'engin de pêche, cordages....)
- construits par l'homme (radeaux à base de bambous et de morceaux de filet)

Depuis des siècles, les hommes ont remarqué que les poissons avaient tendance à se regrouper autour d'objets flottant à la surface des océans. Des objets flottants, appelés Dispositifs de Concentration de Poissons (DCP), ou parfois « épaves flottantes », ont été développés pour des pêcheries artisanales (DCP ancrés) et industrielles (DCP dérivants). Les captures de thons tropicaux réalisées autour des DCP dérivants représentent aujourd'hui plus de la moitié du tonnage capturé mondial de ces espèces.

Les principales hypothèses développées par les scientifiques concernant les raisons poussant les poissons pélagiques à s'agréger autour des DCP sont les suivantes (Fréon et Dagorn, 2000) :

- refuge contre les prédateurs : l'objet peut-être utilisé par les proies comme refuge.
- concentration de nourriture : un objet flottant agrège des proies sur lesquelles des grands poissons pélagiques peuvent s'alimenter.
- l'objet flottant indicateur de la richesse du milieu : les objets flottants naturels sont souvent des indicateurs des zones productives.
- orientation spatiale : les objets flottants procurent des références spatiales autour desquelles les poissons peuvent s'orienter dans un environnement pélagique non structuré.
- point de rencontre : les thons peuvent utiliser les objets flottants pour augmenter le taux de rencontre entre individus isolés ou entre petits bancs.

Ces hypothèses peuvent s'appliquer à une ou plusieurs espèces, mais aucune d'entre elles n'est exclusive (plusieurs hypothèses peuvent expliquer un même comportement agrégatif).

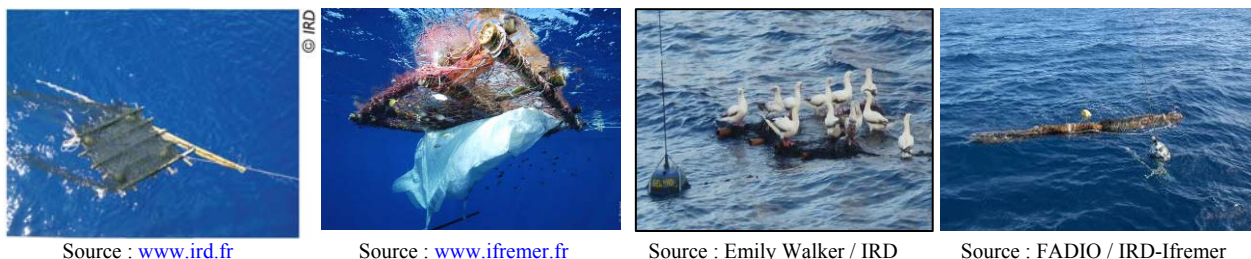


Fig. 4 : Dispositifs de Concentration de Poisson (DCP) : un radeau, un radeau avec des débris, un radeau balisé, un tronc d'arbre équipé d'une balise.

Pour la suite de la thèse, nous nommerons « banc associé » ou « banc sous DCP », un banc se trouvant sous n'importe quel type de DCP (naturel, débris d'origine humaine, ou bien radeau). Les pêcheurs équipent les DCP de bouées (ou balises) radio émettrices ou de GPS pour repérer et suivre les DCP à distance (fig.4) : nous appellerons « DCP instrumenté » ou « DCP balisé », un DCP équipé d'une bouée. Les thons tropicaux étudiés sont donc de grands prédateurs, hautement migrateurs et se déplacent en bancs (bancs libres ou bancs sous DCP). Ils évoluent dans un écosystème marin hauturier, dans notre cas à l'échelle du bassin de l'Océan Indien occidental. Leur habitat est directement influencé par les conditions environnementales de l'Océan Indien, et par la présence de nombreux DCP artificiels mis à l'eau par les pêcheurs. En effet, l'ajout de DCP artificiels aux DCP naturels engendre la multiplication du nombre de DCP par 2 dans certaines zones de l'océan indien (sud-est des Seychelles par exemple) et par 20 dans la zone « Somalie » (Fauvel et al., 2009).

### c) Le bassin océanique de l'Océan Indien (courants, moussons)

Contrairement aux océans atlantique et pacifique, l'Océan Indien est bordé d'un continent sur sa partie septentrionale (à partir d'environ 10°N-15°N), la circulation océanique qui en résulte est assez particulière. Elle est en effet influencée par le système de moussons : la mousson du Nord-Est en janvier-février et la mousson du Sud-Ouest en juillet-août, accompagnée d'un renforcement du courant de Somalie. Celui-ci est caractérisé par une remontée d'eaux froides (upwelling) le long de la côte somalienne favorisant une forte production primaire. Le canal du Mozambique est caractérisé par une activité tourbillonnaire importante (du Sud vers le Nord) induite par le courant Sud-équatorial et alimentant le courant des Aiguilles au large de l'Afrique du Sud (Schouten et al., 2003).

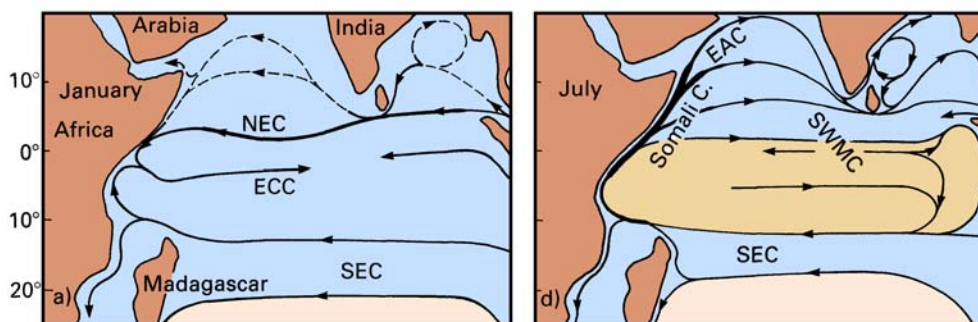


Fig. 5 : Courants de surface dans le Nord de l'Océan Indien, à partir de données de bouées dérivantes, pour les mois de janvier et juillet. SEC : courant Sud-équatorial, NEC : courant Nord-équatorial, ECC : contre-courant équatorial, SWMC : courant de la mousson du Sud-Ouest, EAC : courant de l'est de l'Arabie, Somali C : courant de Somalie. Source : "Regional Oceanography : an introduction". Tomczak and Godfrey (1994).

Les moussons peuvent avoir une influence négative sur la pêche. En effet, le mauvais temps pendant ces périodes entrave le bon déroulement d'un coup de senne, car les senneurs tropicaux sont davantage conçus pour la pêche dans des conditions de mer calme.

La courantologie générale de l'Ouest de l'Océan Indien joue un rôle important pour la pêche thonière à la senne, en particulier depuis le développement de la pêche sous DCP (Dispositif de Concentration de Poisson). La pose et la relève des DCP sont ainsi conditionnées par la direction et la force des courants, ainsi que leur passage dans des zones supposées productives. En effet, les pêcheurs vont relever leurs DCP lorsque ceux-ci se trouvent sur le contre-courant équatorial qui risque d'emporter les DCP dans l'Est de l'Océan Indien, ou bien lorsque le courant de Somalie les emporte vers les zones où les pêcheurs ne peuvent naviguer à cause des risques d'insécurité liés à la piraterie maritime au large des côtes somaliennes.

### **d) L'influence des phénomènes climatiques sur les facteurs environnementaux affectant la pêche**

La cyclicité de certains phénomènes climatiques tels que El Nino (élévation anormale de la température de l'eau dans la partie est de l'océan pacifique Sud) ou son inverse la Nina, est étudiée afin de mesurer l'impact de ces phénomènes climatiques mondiaux sur les captures réalisées par les pêcheries. Des indices construits sur des combinaisons de facteurs environnementaux (« Southern Oscillation Index » (SOI), « North Atlantic Oscillation » (NAO), « Dipole Mode Index » (DMI), et « El Nino Southern Oscillation » (ENSO)) peuvent avoir une influence sur la distribution spatiale des thons tropicaux, et donc sur la répartition des prises par les pêcheries (Corbineau et al. 2008, Ménard et al. 2007).

Plusieurs facteurs environnementaux peuvent être répertoriés comme ayant une influence sur l'habitat des thonidés tropicaux. La plupart des études tient compte de la température de surface de la mer (Boyce et al., 2008, Bard et al., 1998, Cayré and Marsac, 1993), de la teneur en oxygène (Brill, 1994), même si d'autres facteurs tels que la thermocline, la distribution de la production primaire (Zainuddin et al., 2006, Zainuddin et al., 2008) ou l'activité océanique (fronts, tourbillons) (TewKai et al., 2009, Fonteneau et al, 2008) ont également un rôle important dans la définition de l'habitat des thons tropicaux.

Plusieurs études ont montré l'influence de la profondeur de la thermocline sur les pêcheries thonières (Green, 1967 ; Ortega, 1996). En effet, comme le montre la figure 6, en admettant l'hypothèse selon laquelle certaines espèces de thon tropical ont une préférence pour les eaux dont la température est supérieure à la thermocline, la capturabilité de ces espèces aux techniques de pêche, telles que la palangre ou la senne, en est affectée.

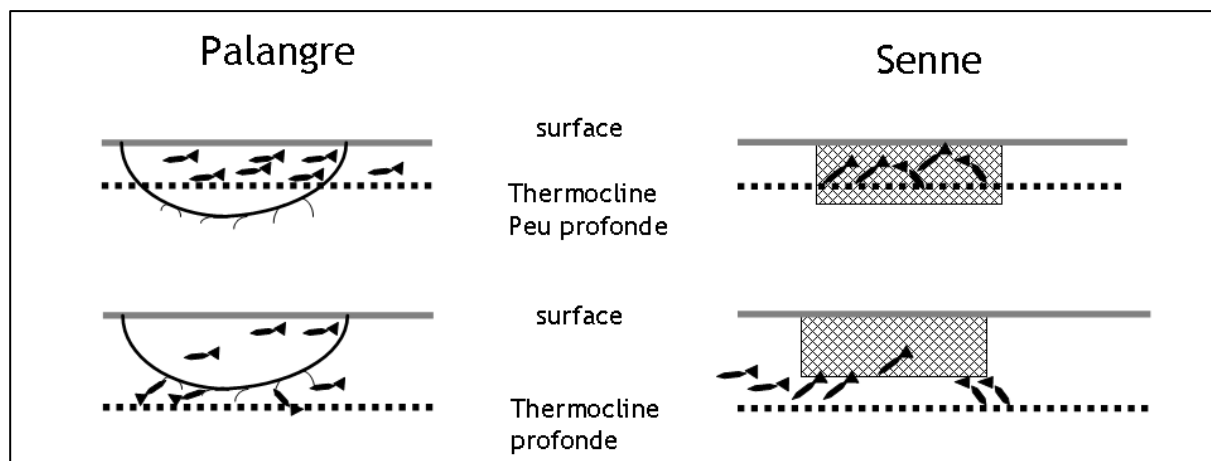


Fig. 6 : Schéma montrant l'influence de la profondeur de la thermocline sur la capturabilité d'un banc de thon pour la pêche à la palangre et la pêche à la senne.

Les pêcheurs reçoivent par satellite les cartes de courants, d'anomalies de hauteur d'eau (Sea Level Anomalies), de température de surface, ainsi que de couleur de l'eau, ce qui leur permet de localiser les zones potentiellement productives et de décider dans quelles grandes zones la pose et la relève de leurs DCP sont judicieuses.

Le thon est une espèce riche en apport nutritif, et certaines espèces sont exploitées par l'homme depuis l'Antiquité. L'objectif de la 2<sup>ème</sup> partie est de comprendre quel est l'historique de l'exploitation des thons dans l'Océan Indien, puis de quelle manière les flottilles française et espagnole exploitent cette espèce grâce à l'engin de pêche nommée la senne.

## **Partie 2. Exploitation du thon dans l'Océan Indien**

### **a) Historique de l'exploitation thonière par différentes flottilles**

Bien que le thon rouge soit exploité en Méditerranée depuis 7000 av. J.-C. grâce aux madragues (Ravier and Fromentin 2004, Foucou 2004), les traces les plus anciennes d'exploitation du thon tropical dans l'Océan Indien remontent au XIV<sup>ème</sup> siècle autour de l'archipel des Maldives.

Le thon de l'Océan Indien a d'abord été capturé par les Maldiviens pratiquant la pêche à l'appât vivant (espèces récifales benthiques de percidés) sur le listao et les petits albacores, autour de leur archipel. Le thon séché et fumé (appelé Hiki-Mas) est d'une haute valeur alimentaire et permet une longue conservation. Il était vendu à tous les navigateurs de l'Océan Indien à partir du XIV<sup>ème</sup> siècle. Les bancs de bonites étaient repérés grâce aux oiseaux et aux épaves flottantes (Doumenge 1998).

Dans le Golfe de Gascogne, les thoniers bretons (Ile d'Yeu, île de Groix, Concarneau etc.) et basques (Berméo, Saint-Jean de Luz) pêchent le germon et le thon rouge à la ligne de traîne sur des voiliers (appelés lougre puis Dundee). Un véritable essor de ces pêcheries s'opère avec le développement de conserveries autour de 1880 (19<sup>ème</sup> et début 20<sup>ème</sup> siècle).

A partir de 1949 les Luziens, puis les Concarnois modifient leur technique pour la pêche à la canne à l'appât vivant, qui augmentent les performances de pêche pour le germon et le thon rouge.

## **CHAPITRE 1 - Contexte : pourquoi étudier l'effort de pêche des thoniers senneurs ?**

---

Ces canneurs vont tenter une campagne à Dakar en 1955, ce qui est le début de l'exploitation du thon de l'Atlantique tropical (Golfe de Guinée).

C'est au début des années 1960 que se développe la pêche à la senne, notamment par l'équipement du skiff (petit bateau annexe servant au maniement de la senne). Les navires se perfectionnent avec la mise en place de congélation à bord. La pêche s'amplifie avec la création de conserveries à terre, ce qui marque le début de la pêche industrielle.

Contrairement à la pêche à la senne qui est dite pêche « de surface », la pêche à la palangre, par sa particularité de disposer une longue ligne d'hameçons, est une technique ciblant des espèces évoluant dans des eaux plus profondes. Dans l'Océan Indien, la flotte des palangriers japonais est déployée à partir du début des années 1950 (ainsi que dans l'Atlantique tropical). Ces bateaux se modernisent par l'installation de congélateurs à partir de 1974. La flottille de palangriers est composée de navires japonais, taïwanais et coréens, pêchant essentiellement dans la partie orientale de l'Océan Indien, contrairement aux senneurs européens pêchant dans la partie occidentale (excepté pendant l'évènement El Nino de 1997-1998). La flottille de thoniers senneurs s'est développée de manière importante au début des années 1980 (fig.7a), ce qui a entraîné une forte augmentation des prises d'albacore et de listao dans l'Océan Indien entre 1980 et 1990 (fig.7b).

Mises à part les flottilles de pêche industrielle (senneurs européens et palangriers asiatiques pour la majorité), la part de la pêche artisanale dans le total des captures thonières de l'Océan Indien est relativement importante (environ 30% des captures totales, FAO, 2004). A l'échelle de l'océan global, la part des captures de thon par des engins autres que la palangre, la senne, la canne a augmentée depuis les années 1970, pour atteindre 13 % des captures totales en 2002 (fig.7a).

Les grands senneurs océaniques (appelés aussi thoniers-senneurs congélateurs) ont pour habitude de cibler dans un premier temps l'albacore qui se vend au meilleur prix. Dans un second temps, ces navires recherchent les bancs de thon plus mélangés (listao, juvéniles d'albacore, thon obèse etc.) qui sont souvent regroupés sous les DCP. Cette stratégie peut évoluer en fonction des prix de l'albacore et du listao.

Contrairement à la majorité des palangriers qui transbordent à bord de cargos leurs captures destinées aux marchés asiatiques, les senneurs européens ont l'habitude de débarquer leurs captures dans certains ports de l'Océan Indien possédant une conserverie (Seychelles, Kenya, Maurice, Madagascar, Thaïlande). La majorité du thon pêché par les senneurs européens est en effet destinée à la conserve, seule une partie de la capture de patudo alimentera le marché du sashimi (FAO 2007).

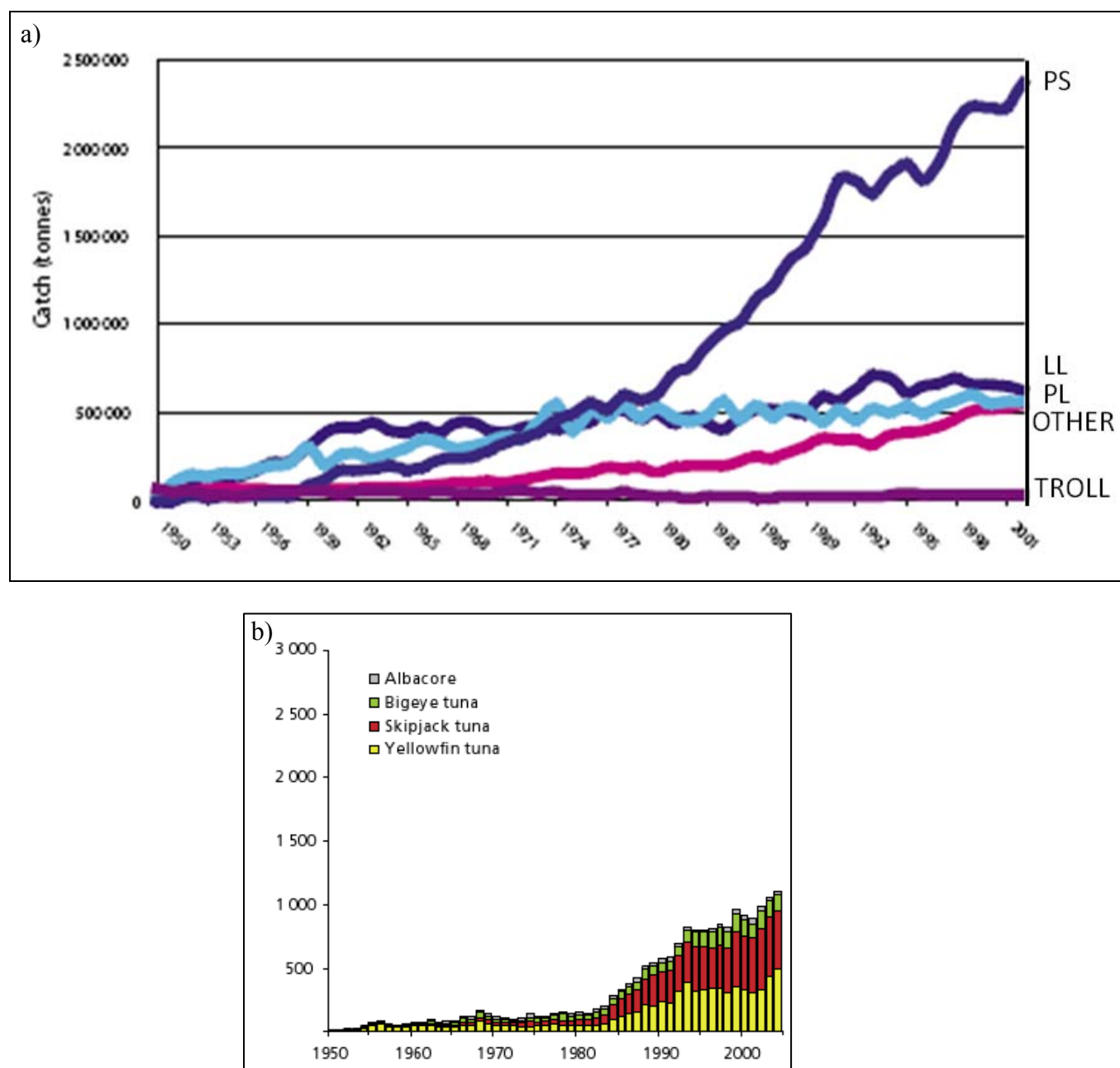


Fig. 7 : (a) Captures globales des principales espèces commerciale de thon par engin de pêche (LL : palangriers, PL : canneurs, PS : senneurs, TROLL : ligneurs, OTHER : autres engins (filet à poche, autres sennes, chaluts, madragues). (b) Captures des principales espèces commerciale de thon dans l'Océan Indien en milliers de tonnes (albacore : germon, bigeye tuna : patudo, skipjack tuna : listao, yellowfin tuna : albacore). Source : FAO 2004. Management of tuna fishing capacity: conservation and socio-economics, 2<sup>nd</sup> meeting of the technical advisory committee of the FAO project, March 2004, Madrid, Spain.

### b) Exploitation par les thoniers senneurs océaniques (français et espagnols)

Les premières campagnes de thoniers senneurs dans l'Océan Indien ont eu lieu au début des années 1970 par les flottilles japonaise et australienne. Les thoniers français ont commencé à exploiter le bassin occidental de l'Océan Indien au départ des Seychelles dans les années 1980, avec des captures qui ont crû rapidement à partir de 1984. La zone prospectée s'étend de 10°N (Somalie) à



23°S dans le canal du Mozambique, et de la limite des ZEE des pays est-africains à 75°E (archipel des Chagos) (Marsac, 1992) (fig.8).

Les ressources en thons de l'Océan Indien (en ce qui concerne les eaux internationales) sont désormais exploitées par plusieurs flottilles (Français, Espagnols, Japonais, Taiwanais, Coréens, Russes), avec différents engins (palangre, senne, canne) (Doumenge, 1998). La pêche à la senne représente 43% des tonnages totaux de l'Océan Indien (FAO, 2004), avec 90 000 tonnes de thon capturé par les senneurs français et 130 000 tonnes par les senneurs espagnols, pour l'année 2000. Dans cette thèse, nous nous intéresserons uniquement aux thoniers senneurs français.

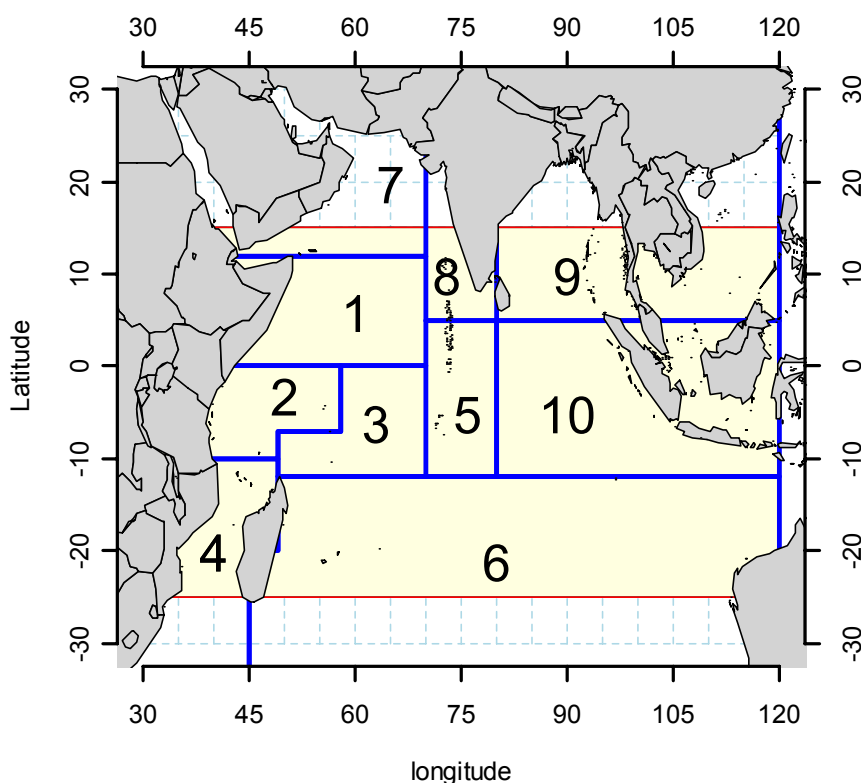


Fig. 8 : Zones de pêche de l'Océan Indien. Les six zones principales d'exploitation de l'Ouest de l'Océan Indien sont les zones Nord-équatoriale (1), Ouest Seychelles (2), est Seychelles (3), canal du Mozambique (4), archipel des Chagos (5), Sud Seychelles (6).

La répartition très saisonnière de l'effort de pêche est une caractéristique majeure de cette pêcherie. En effet, selon la saison, les patrons de pêche décideront de chercher les bancs dans telle zone plutôt que dans une autre. Les strates spatio-temporelles (c'est-à-dire la zone et la saison) de recherche de bancs se retrouvent d'année en année, excepté lors de l'évènement chaud El Niño de 1997-1998 qui induit une extension des zones de pêche aux zones orientales de l'Océan Indien.

La pêcherie thonière à la senne de l'Océan Indien se caractérise par deux modes de pêche, la pêche s'exerçant sur les bancs libres (mattes) d'une part, et la pêche s'exerçant sur les bancs associés à une épave dérivante (ou DCP, Dispositif de Concentration de Poisson) d'autre part. Les deux types d'activité sont appliqués par les senneurs, avec une composante saisonnière : certaines saisons (décembre à mars, et juillet-août) sont plus favorables à la pêche de bancs libres, tandis que d'autres (avril à juin, et septembre à novembre) sont davantage consacrées à la pêche sous Dispositif de Concentration de Poisson (Fonteneau, 1992).



Une autre caractéristique de la pêche à la senne réside dans le fait que la pêche se déroule à vue. Les coups de senne n'ont donc lieu que pendant la journée. Traditionnellement, les pêcheurs préfèrent pêcher les bancs sous DCP tôt le matin, car les bancs ont tendance à se disperser et à s'éloigner du DCP dans la journée. La pêche sur bancs libres peut avoir lieu toute la journée (Fonteneau, 1992). La pêche sous DCP a souvent lieu sur des DCP balisés par le navire (« DCP propre »), mais il peut arriver qu'un DCP soit repéré au cours des phases de prospection, nous parlerons dans ce cas de « DCP trouvé ». La nuit, l'activité du navire consiste soit à faire route vers une zone ou vers un DCP muni d'une bouée appartenant au navire, soit à dériver, le moteur coupé, près d'un banc ou d'un DCP préalablement repéré.

A une échelle mondiale, beaucoup de pêcheries thonières reposent désormais sur l'exploitation d'agrégations de poissons autour d'objets flottants. Depuis le début des années 1980, le DCP dérivant est devenu un outil incontournable pour l'exploitation industrielle du thon à la senne. Les DCP dérivants peuvent être naturels (algues, branches, débris végétaux...), issus de la pollution humaine (planche, morceau d'engin de pêche...), ou bien construits par l'homme (Taquet, 2004).

De nos jours, toutes les flottilles de thoniers senneurs océaniques ont l'habitude d'utiliser des DCP du type radeau de bambou d'environ 3 x 2 m (Fonteneau et al. 2000a). Ils sont équipés d'une bouée de localisation radio HF ou satellite parfois complétée d'un système de détection du poisson agrégé. Certaines flottilles de thoniers senneurs (espagnols en particulier) utilisent les services de navires de soutien « Supply Vessels » pour fabriquer et gérer leurs DCP dérivants ce qui constitue une augmentation sensible, mais non quantifiée, de la capacité de pêche de ces flottilles (Arrizabalaga et al., 2001).

Les DCP dérivants réduisent la proportion de coups nuls, limitent le temps de recherche du poisson et augmentent la flexibilité des opérations de pêche. Ces transformations des modes d'exploitation, impliquent une révision de la notion d'effort de pêche pour la gestion des stocks de grands pélagiques. La pêche sous DCP a également modifié la structure de tailles des thons exploités avec un plus grand nombre de petits poissons capturés autour des DCP comparé aux bancs libres, ce qui peut conduire à des situations de surexploitation de certains stocks (Fonteneau et al. 2000a).

### Stratégies de pêche : méthodes de recherche de bancs

Mieux comprendre les méthodes de recherche de bancs, puis de poursuite d'un banc, permet d'améliorer la définition de l'effort de pêche d'un thonier senneur tropical. Dans l'Océan Indien, les deux flottilles de senneurs, française et espagnole, ont des stratégies très différentes en ce qui concerne la recherche de bancs libres ou la recherche d'épaves. En effet, les armements espagnols investissent beaucoup dans l'exploitation de bancs sous épaves, en mettant à disposition des pêcheurs un grand nombre de bouées émettrices sophistiquées, et en affrétant des navires « supply » prospectant et entretenant les épaves balisées des senneurs.

La situation n'est pas la même pour les pêcheurs français, dont la part variable du salaire est indexée sur la quantité d'albacore (se trouvant principalement sur bancs libres). Les senneurs français ciblent donc d'abord l'albacore, plutôt que le listao (vendu moins cher), et ne sont pas autant équipés en bouées à fixer sur les DCP. Les senneurs français ont donc tendance à privilégier la pêche sur bancs libres (avec une plus forte probabilité de pêcher de l'albacore de poids élevé), et de ne pêcher sur épave que lorsqu'il n'y a pas de possibilité de pêcher des bancs libres.

Les étapes de décision de recherche dans une zone, puis de repérage des bancs se déroulent de la manière suivante :

- 1- La zone générale de prospection est définie à partir des données de plancton et température envoyées par les armements, des positions des bouées du navire, des informations communiquées par les autres patrons, des zones prospectées auparavant, et de l'historique des coups de pêche du navire (et des autres navires). La décision de mettre le cap sur une zone est aussi dépendante des licences (pour pêcher dans les eaux nationales de Madagascar, du Kenya, ou de la Tanzanie) que possède ou non le navire. *L'échelle spatiale est supérieure à plusieurs centaines de kilomètres.*
- 2- Les groupes d'oiseaux sont repérés sur le radar à oiseaux : si les oiseaux pointés restent en groupe et ne se déplacent pas trop vite, le navire prend cette direction. *L'échelle spatiale est un rayon d'une trentaine de kilomètres autour du navire.*
- 3- Les marins qui veillent aux jumelles repèrent les apparences de banc (sauts, balbaya, sardara) avec les oiseaux. Ils doivent aussi repérer la présence ou non d'espèces protégées (telles que les marsouins) avec le banc de thon, car dans ce cas, le patron change aussitôt de cap, en se détournant de ce banc. *L'échelle spatiale est un rayon d'une douzaine de kilomètres autour du navire.*
- 4- Le banc est délimité grâce au sonar et au sondeur latéral. *L'échelle spatiale est un rayon d'un à deux kilomètres autour du navire.*
- 5- La dynamique spatiale du banc (vitesse, taille et dispersion) est évaluée par les marins. La décision de larguer le filet est prise en fonction de ces paramètres. *L'échelle spatiale est un rayon de un kilomètre autour du navire.*

Certaines des étapes menant à la calée telle que la route (changement de zone de pêche) ou la poursuite de bancs, ont été prises en compte par Gaertner et al. (1999), mais les étapes de recherche (étapes 2, 3, et 4) sont plus rarement étudiées.

### **Partie 3. Problématique de la thèse**

L'objectif de cette partie est de cerner les enjeux halieutiques de l'étude des trajectoires de thoniers senneurs tropicaux, à travers l'estimation de l'abondance de stocks exploités, de comprendre comment est menée l'évaluation des stocks des thons tropicaux, et enfin d'expliquer la problématique de la thèse. Le contexte méthodologique est basé sur l'application de méthodes de statistique spatiale aux données de pêche, dans le but de proposer la cartographie de l'abondance des thons tropicaux exploités par les thoniers senneurs français.

#### **a) Estimation d'abondance des stocks exploités**

L'objectif de cette partie est de répondre aux questions suivantes : qu'est ce que l'abondance ? Comment est estimée l'abondance d'un stock exploité ? Pourquoi cherche-t-on à mesurer l'abondance ? Pourquoi utilise-t-on un indice d'abondance ?

## **CHAPITRE 1 - Contexte : pourquoi étudier l'effort de pêche des thoniers senneurs ?**

---

Pour suivre la dynamique des populations de thon, les commissions d'évaluation des stocks d'espèces marines exploitées par l'homme basent leurs estimations sur des calculs d'indice d'abondance reposant sur plusieurs concepts, dont il n'est pas inutile de rappeler ici les définitions.

### Abondance et biomasse

Tout d'abord, l'abondance est le nombre d'individus d'une population donnée, d'un stock (ici de thon tropical). La biomasse correspond au poids du stock de cette espèce (abondance du stock en unité de poids).

### Effort de pêche

L'effort peut être qualifié de nominal (tel qu'il est vu par le pêcheur) ou d'effectif (tel qu'il est « ressenti » par le poisson). Plusieurs définitions sont proposées dans la littérature.

« Beverton et Holt (1957) distinguent la notion d'effort de pêche, qui est une mesure de la pression à laquelle un stock est soumis, et la notion d'intensité de pêche qui est une mesure de la pression exercée sur une zone géographique donnée. »

Poinsard et Le Guen (1975) : « L'effort de pêche appliqué à un stock d'animaux aquatiques est une mesure de l'ensemble des moyens de captures mis en œuvre par les pêcheurs sur ce stock durant un intervalle de temps déterminé ».

Laurec et Le Guen (1981) définissent l'effort de pêche de la manière suivante :

« On peut alors exprimer l'unité d'effort :

- soit par des éléments simples (nombre d'hameçons, nombre de casiers...),
- soit par l'ensemble des opérations effectuées pendant un nombre d'heures ou de jours de présence dans l'aire de pêche ».

L'effort de pêche effectif correspond à la standardisation de l'effort de pêche nominal pour assurer la relation proportionnelle entre l'effort et la mortalité par pêche (en tenant compte des interactions entre les navires, de la saturation des engins).

Les efforts de pêche actuellement calculés sur les données des thoniers senneurs tropicaux sont :

- le nombre de calées par strate spatio-temporelle (par mois et par carré de 5°/5° par exemple),
- le nombre de jours de pêche
- le nombre d'heures de recherche (hors temps de calées, temps de nuit, et temps de route sur la zone de pêche).

L'évolution temporelle de ces efforts de pêche est présentée dans le chapitre 2, partie 1.

### Captures

Les captures correspondent aux tonnages pêchés (par coup de pêche et/ou par espèce).

### Indice d'abondance

Un indice d'abondance permet d'approcher, à un facteur proportionnel près, l'abondance (en nombre) ou la biomasse (en poids) du stock de thon tropical dans notre cas. L'indice d'abondance couramment utilisé à partir des données de pêche est la Capture Par Unité d'Effort (CPUE). Les indices d'abondance sont généralement exprimés en unités relatives (contrairement aux mesures de l'abondance absolue) et indiquent simplement les changements relatifs qui affectent l'abondance dans

## **CHAPITRE 1 - Contexte : pourquoi étudier l'effort de pêche des thoniers senneurs ?**

---

le temps. La plupart des indices d'abondance qui sont utilisés par les commissions thonières est fondée sur des données de CPUE standardisées, même si certains indices d'abondance, indépendants des pêcheries et établis à partir d'études scientifiques (données de marquage de poisson par exemple) sont également utilisés.

### Capture Par Unité d'Effort (CPUE)

La CPUE correspond au volume de la capture par unité d'effort de pêche (par exemple, pour la senne, nombre de calée/mois ou tonnage pêché/strate spatio-temporelle). La CPUE standardisée sert d'indice d'abondance de donnée d'entrée pour les modèles d'évaluation.

La CPUE est définie de la manière suivante :

$$CPUE = \frac{C}{E} = q \cdot N = q \cdot \frac{N}{A}$$

avec C : captures, E : nombre d'unités d'effort, q : capturabilité, N : nombre d'individus, A : surface considérée

La capturabilité (q) est la fraction du stock qui est pêchée par une unité d'effort de pêche (Laurec and Le Guen, 1981). La capturabilité est conditionnée par la disponibilité du poisson aux pêcheurs, qui peut elle-même varier en fonction des variations climatiques par exemple (lorsque la disponibilité augmente, la capturabilité augmente pour le même effort de pêche). Plus précisément, la disponibilité résulte de l'accessibilité et de la vulnérabilité. L'accessibilité correspond au taux de présence sur les lieux de pêche et à la variabilité inter-annuelle ou saisonnière de l'environnement à grande échelle. La vulnérabilité est définie comme la variabilité inter ou intra-journalières de paramètres environnementaux influant le comportement des espèces (Gascuel, 1993).

### Remise en cause de la CPUE comme indice d'abondance

L'utilisation de la CPUE comme indice d'abondance impose que la relation entre les captures et l'effort soit proportionnelle à l'abondance réelle du stock.

Or la CPUE peut ne plus être un indice d'abondance pertinent, notamment lorsqu'il y a des changements importants dans la répartition spatiale de l'activité de pêche (Walters 2003) ou lorsque l'évolution des équipements technologiques est importante. Cela a déjà été avéré dans le cas de l'évaluation de stocks de thon tropical (Fonteneau et al., 1999 ; Maunder et al., 2006 ; Polacheck, 2006).

De plus, les CPUE ne sont pas toujours représentatives de l'abondance dans les cas d'hyperdéplétion ou d'hyperstabilité (Hilborn and Walters, 1992 p. 176, 186-192). En effet, l'hyperdéplétion est caractéristique d'une situation où la CPUE décroît fortement, alors que ce n'est pas le cas de l'abondance réelle. Ceci survient lorsque des zones non exploitées à certaines périodes de la pêcherie ne sont pas prises en compte dans le calcul de la CPUE. Dans ce cas, la CPUE traduit une déplétion locale d'agréations spatiales à (trop) fine échelle, ce qui ne représente pas le stock dans sa globalité. L'hyperstabilité correspond à une stabilité apparente des CPUE alors que l'abondance du stock est en réalité décroissante. Alors que l'effort déployé (en temps de mer ou de recherche de bancs) ne varie pas, l'efficacité de pêche s'est accrue, grâce à l'évolution des moyens technologiques utilisés. L'hyperdéplétion et l'hyperstabilité sont donc deux cas pour lesquels l'utilisation des CPUE comme indice d'abondance est inappropriée. Ces biais peuvent être identifiés en comparant les estimations de stock avec les résultats de campagnes scientifiques (Harley et al., 2001) et l'utilisation d'autres indices d'abondance est alors recommandée (Gillis and Peterman, 1998).

En l'absence de données complémentaires sur le stock, telles que les données de campagnes scientifiques, il est difficile de valider un indice d'abondance calculé à partir des CPUE.

### **b) Evaluation des stocks de thon tropical**

Dans le cas d'espèces hautement migratrices et vivant en milieu océanique (telles les espèces de thons), l'évaluation ne peut être entreprise à partir de campagnes scientifiques, la zone étant trop grande et donc trop coûteuse à échantillonner (FAO, 2007). L'évaluation des stocks de thons tropicaux est établie à partir des seules données disponibles concernant les espèces, celles issues de la pêche. Les pêcheurs sont donc considérés comme les « échantillonneurs » (non aléatoires, Hilborn and Walters 1992, p.177), et l'étude des stratégies de pêche permet de comprendre les mécanismes de cet échantillonnage, afin de tenir compte des biais d'échantillonnage au moment de l'évaluation du stock.

Les commissions thonières internationales ont pour mission de gérer les stocks de thons dans les différents océans. Elles utilisent, parmi les données de pêche, les captures (quantité de poisson pêché à une période donnée dans une zone donnée), ainsi que l'effort de pêche (temps de recherche permettant les captures pour le cas des thoniers senneurs), qui a engendré ces captures.

A partir des captures et des efforts, les Captures Par Unité d'Effort (CPUE) ou Prise par Unité d'Effort (PUE) sont calculées et sont interprétées comme un indice d'abondance. La relation entre l'abondance (nombre de poissons du stock) et l'indice d'abondance (CPUE) est proportionnelle, le facteur de proportionnalité étant la capturabilité  $q$ .

$$Abondance = \frac{1}{q} \cdot CPUE = \frac{1}{q} \cdot \frac{Captures}{Effort}$$

Malgré la remise en cause des CPUE comme indice d'abondance pour les stocks de thon (Walters, 2003 ; Polacheck, 2006), notamment à cause de l'évolution des équipements technologiques (sonar, sondeurs), ces indices sont toujours utilisés par les Commissions thonières, mais sont standardisés afin de tenir compte de cette évolution. Leur but est de refléter les variabilités interannuelles et de servir de base pour étudier les tendances, et non pas d'analyser les valeurs absolues de ces indices.

L'effort de pêche est calculé de différentes manières selon les pêcheries : nombre d'heures de recherche (ou nombre de calées ou nombre de jours de mer) pour les thoniers senneurs, nombre d'hameçons pour les palangriers, nombre de jours de mer pour les canneurs.

### Calcul actuel de la CPUE

Pour les thoniers senneurs tropicaux européens, trois types d'effort sont calculés, avec une différenciation entre l'effort attribué aux calées sur bancs libres et celui attribué aux calées sur bancs associés à un DCP. Les trois efforts sont les suivants pour les bancs libres :

- le nombre de jours de mer
- le temps de pêche : nombre d'heures de jour (environ 12h à l'équateur) diminué du nombre d'heures en avarie
- le temps de recherche : nombre d'heures de jour diminué du nombre d'heures en avarie et du nombre d'heures de pêche.

## CHAPITRE 1 - Contexte : pourquoi étudier l'effort de pêche des thoniers senneurs ?

---

Ces efforts de pêche sont utilisés dans le calcul actuel des CPUE (captures par unité d'effort) standardisées de thoniers senneurs. Les CPUE sont calculées par catégorie de navire et strate spatio-temporelle. La série temporelle des CPUE est interprétée comme un indice d'abondance des espèces exploitées :

$$\text{Indice Abondance} = \text{CPUE}_{ik \text{ standardisées}}$$

$$\text{CPUE}_{ik \text{ standardisées}} = \frac{\text{Captures}_{ik}}{\text{Effort}_{\text{standardisé}}}$$

$$\text{Effort}_{\text{standardisé}} = \text{Hrecherche}_{ik}$$

$$\text{Hrecherche}_{ik} = \text{Hjour}_{ik} - \text{Htransit}_{ik} - \text{Hpêche}_{ik}$$

$$\text{Hpêche}_{ik} = \sum \text{durées calées}_{ik \text{ estimées}}$$

Pour :  $k$ , la strate spatio-temporelle,  
 $i$ , la catégorie de navire (taille et pays),  
 $\text{Hrecherche}$ , le nombre d'heures de recherche de bancs,  
 $\text{Hjour}$ , le nombre d'heures de jour,  
 $\text{Hpêche}$ , le nombre d'heures passées en pêche.

La durée de chaque calée n'étant pas indiquée dans les livres de bord, le tonnage noté par le patron pour chaque calée servira de base au calcul du nombre d'heures passé en pêche. En effet, celui-ci est calculé à partir d'une régression basée sur les données notées par les observateurs scientifiques embarqués (sur 10% des navires). La régression de la durée des calées sur le tonnage pêché de ces calées est ensuite extrapolée pour l'ensemble des tonnages des calées répertoriées dans les livres de bord. Deux régressions sont calculées l'une pour les calées ayant lieu sur les bancs libres et, l'autre pour les bancs associés séparément, dont on extrait les quantiles 5% et 95%.

Or ces CPUE sont biaisées, à cause des différences de conditions de recherche et de pêche entre les bateaux et de l'évolution de l'équipement à bord au cours du temps, notamment par l'équipement de puissants sonars, sondeurs, etc. (FAO, 2007). Ces biais sont alors palliés par une étape de standardisation des CPUE.

La standardisation des CPUE est réalisée grâce à des modèles GLM (Generalised Linear Model) avec un modèle delta-lognormal (Soto et al., 2008) dont les variables explicatives sont :

- l'année
- la zone
- le trimestre
- la catégorie du navire (jauge)
- le pays
- la date de début des opérations du navire

Les facteurs les plus explicatifs sont l'année et la zone. Ces facteurs seront déterminants lors de la standardisation des CPUE des thoniers senneurs.

Plusieurs CPUE standardisées calculées sur les données de palangriers japonais et de thoniers senneurs, ainsi que les données de marquage (Regional Tuna Tagging Project – Indian Ocean), sont

utilisées dans les modèles d'évaluation des stocks des espèces de thons majeurs (albacore, listao, patudo, germon).

Plusieurs modèles ont été testés à partir des données de CPUE, notamment un modèle de surplus de production, un modèle « stock synthesis 2 » et un modèle de production structuré par âge (ASPM) (CPUE de palangriers japonais et taïwanais) (IOTC-2008-WPTT-12, 21, et 28). Mais ces modèles ne tiennent pas compte des CPUE des thoniers senneurs européens.

Un modèle de population structuré par strates spatio-temporelles et basé sur les tailles/âges, appelé « Modèle MULTIFAN-CL » est utilisé pour l'évaluation des stocks de thon du Pacifique central et oriental. Ce modèle a été appliqué en 2008 au stock d'albacore de l'Océan Indien (IOTC-2008-WPTT-10). Il prend en compte les CPUE des senneurs (en distinguant prises sur bancs libres et prises sous objets flottants), par strates spatio-temporelles. Les CPUE des palangriers asiatiques sont utilisées comme indices d'abondance relative du stock. Les séries de CPUE utilisées dans les modèles comme MutliFAN sont pour la majorité des séries de CPUE de palangriers japonais, taïwanais et coréen, alors que les CPUE de senneurs européens sont résumées en une seule série (IOTC-2008-WPTT). La prise en compte des CPUE de palangriers et de senneurs est déséquilibrée entre les nombreuses séries temporelles pour les palangriers et l'unique série temporelle pour les senneurs.

### c) Méthodes de statistiques spatiales appliquées à l'halieutique

L'application de méthodes de statistiques spatiales est conditionnée par le type de données halieutiques disponibles pour l'évaluation d'un stock.

Les données peuvent être issues de campagnes acoustique et chalutage : l'échantillonnage est maîtrisé, et éventuellement régulier sous forme de transects. En revanche, l'échantillonnage résultant des livres de bord, des marques recapturées, ou des observateurs embarqués, est directement dépendant des trajectoires de navire décidées par les pêcheurs (Table 2). On considère ce type d'échantillonnage comme aléatoire, bien que certaines variables influent les décisions prises par les pêcheurs (météorologie, expérience, informations des autres pêcheurs). Les données VMS, quant à elles, reflètent l'échantillonnage réalisé par les pêcheurs, mais n'ont pas été analysées spatialement dans le but d'estimation d'abondance.

Table 2 : Type de données halieutiques et échantillonnage de l'espace associé.

Type de données	Echantillonnage
Transects (campagnes Acoustique / chalut, survol aériens)	contrôlé
Marquage-recapture	contrôlé (marquage), non contrôlé (recapture)
Livres de bord	non contrôlé (dépendant des pêcheurs)
Observateurs	non contrôlé (dépendant des pêcheurs)
Données VMS	non contrôlé (dépendant des pêcheurs)

Pour résumer l'information spatiale des données, plusieurs indicateurs spatiaux peuvent être calculés (Woiliez et al. 2007). Un indicateur spatial est calculé sur les données en tenant compte de leur position dans l'espace : l'intervention spatiale de deux données modifiera la valeur de l'indicateur. Il

existe un seul résultat lié à une répartition spatiale des données considérée. Woillez et al. (2007) mettent en évidence des indicateurs tels que le centre de gravité et l'inertie (barycentre pondéré et dispersion pondérée par les biomasses), l'indice global de colocation entre deux populations (calcul le niveau de recouvrement spatial des populations), ou des indices d'occupation de l'espace (Woillez et al., 2007 ; Mathieu Woillez, 2007, Thèse de doctorat).

La géostatistique permet, à partir d'observations ponctuelles, d'estimer une variable sur un champ, c'est-à-dire un domaine où la variable d'étude est non nulle. Les hypothèses courantes peuvent se résumer ainsi :

- la variable est stationnaire dans son champ (invariant par translation),
- la variable d'étude est une réalisation d'une fonction aléatoire, dont les moments d'ordre 1 et 2 sont connus,
- la variable régionalisée est additive (la valeur moyenne est égale à la moyenne des valeurs) et nulle en dehors du domaine.

La structure spatiale est analysée grâce au calcul de variogramme sur la base des données observées spatialisées. Le krigeage constitue un estimateur sans biais, et l'incertitude autour des estimations est quantifiée par la variance d'estimation. Le support d'estimation peut être ponctuel ou par bloc.

La géostatistique est d'un grand intérêt dans l'étude des populations marines, car elle offre la possibilité d'interpoler les valeurs observées (des biomasses pêchées par exemple) sur l'ensemble de la zone d'étude, en tenant compte de la structure spatiale des données (Rivoirard et al., 2000 ; Petitgas, 2001).

La géostatistique transitive est appliquée dans de nombreux cas halieutiques, car le champ est inclus dans la démarche, alors que la géostatistique intrinsèque s'intéresse uniquement à la distribution propre à la variable étudiée (Bez, 2002 ; A. Faraj, 2009, Thèse de doctorat). La géostatistique transitive permet d'estimer l'abondance globale avec la variance d'estimation à partir du covariogramme et d'interpoler entre les observations. Cette méthode repose sur la simplification de certaines hypothèses de la géostatistique classique, mais avec des contraintes liées au type d'échantillonnage (Bez 2007).

La géostatistique est aujourd'hui couramment utilisée pour la cartographie de stocks d'espèces marines (Rivoirard, 1994 ; Petitgas, 2001 ; Kulka et al., 2005 ; Rufino et al., 2006 ; Faraj and Bez, 2007 ; Doray et al., 2008 ; Adams et al., 2008).

Cette méthode est donc appropriée pour l'analyse de données halieutiques et pourra être mise en œuvre pour l'estimation d'abondance de thon à partir des trajectoires VMS des thoniers senneurs.

Outre la géostatistique, selon la nature des données, la théorie des processus stochastiques peut être appliquée à des problématiques halieutiques. Un processus stochastique  $\{x_t, t \in T\}$  est une collection de variables aléatoires indexées par un paramètre  $t$  et définies sur un même espace de probabilités. La variable  $X_t$  représente l'état du processus au temps  $t$  et l'ensemble de toutes les valeurs possibles pour cette variable est appelée l'espace des états du processus et sera notée  $S$  (« state-space model »). Un processus stochastique dont l'ensemble des états  $S$  est fini ou dénombrable est appelé une chaîne. Un processus est à temps discret lorsque l'ensemble  $T$  est fini ou dénombrable. Dans le cadre de la modélisation par processus markovien, l'évolution du système est supposée correspondre à un processus markovien, c'est-à-dire que le système suit une succession d'états distincts dans le temps, en fonction de probabilités de transitions. L'hypothèse de Markov est définie de la manière suivante : les probabilités de transitions ne dépendent que des  $n$  états précédents. Lorsqu'on considère que l'état courant ne dépend que de l'état précédent, on se place dans le cadre d'un modèle markovien d'ordre 1.



Les modèles hiérarchiques sont construits lorsque l'on cherche à estimer une variable latente, non observée, à partir de variables observées dont les relations avec la variable latente sont connues. Dans le cas de modèles hiérarchiques à états latents markoviens, les états sont appelés « états cachés ».

L'application d'un modèle à espaces d'états markoviens cachés peut être implémentée dans un cadre bayésien (Parent and Bernier, 2007 ; Robert, 1992). On nomme inférence bayésienne la démarche logique permettant de calculer ou réviser la probabilité d'une hypothèse. Cette démarche consiste en l'utilisation de règles strictes de combinaison des probabilités, desquelles dérive le théorème de Bayes. Le théorème de Bayes peut s'écrire de la manière suivante :

$$P(A / B) = \frac{P(B / A).P(A)}{P(B)}$$

Le théorème de Bayes permet d'inverser les probabilités. C'est-à-dire que si l'on connaît les conséquences d'une cause, l'observation des effets permet de remonter aux causes. Dans le cadre bayésien, une probabilité n'est pas interprétée comme le passage à la limite d'une fréquence, mais plutôt comme la traduction numérique d'un état de connaissance.

### **d) Objectifs de la thèse et méthodologie mise en œuvre**

La problématique de la thèse est d'améliorer la compréhension de l'activité de pêche afin, d'une part, d'affiner le calcul de l'effort de pêche des thoniers senners français, et, d'autre part, d'estimer spatialement l'abondance de thon tropical dans l'Océan Indien.

Le choix de la démarche s'est orienté vers une approche « data driven » : l'exploration des données oriente la méthodologie. Les données dont nous disposons pour répondre à cette problématique sont les données « VMS » (exhaustives sur la flottille française), les données de livres de bord (logbooks exhaustifs sur toutes les flottilles basées aux Seychelles), et les données collectées par les observateurs (10% de la flottille française échantillonnée, depuis 2005).

La cartographie de l'abondance de thon nécessite que les activités de pêche soient au préalable identifiées sur les trajectoires. L'approche par processus markovien dans un cadre bayésien est adaptée à l'analyse des trajectoires, en raison de la nature de la donnée VMS. L'objectif de la mise en œuvre de cette méthode est donc d'identifier les activités de pêche en chaque point des trajectoires VMS. Les données Observateurs seront utilisées pour la calibration et la validation du modèle.

L'extraction des positions de chaque activité conduit à la cartographie de cette activité pour toute la flottille pour la période considérée (chaque mois des années 2006, 2007, et 2008). L'estimation d'un proxy de présence/absence de thon est calculée par cokrigage d'indicateurs (une indicatrice par activité de pêche), et pourra être interprétée comme un indice d'abondance suivi au cours du temps.

### **Conclusion du chapitre**

Le premier chapitre a permis de présenter le contexte halieutique et méthodologique ainsi que la problématique de la thèse. L'application d'un modèle markovien bayésien aux données de trajectoire de navires pourra être envisagée dans le but d'estimer l'activité de pêche. Les méthodes de géostatistique conviendront pour l'estimation spatiale de l'abondance des thons tropicaux. Il s'agit donc dans le deuxième chapitre de présenter les mécanismes de la pêche thonière à la senne française à travers les différents jeux de données disponibles, qui orienteront les choix définitifs de la méthodologie.

## ***CHAPITRE 2***

### **La pêche thonière tropicale à la senne : analyses préliminaires des données**

L'objectif de ce chapitre est, dans une première partie, de présenter l'évolution de la pêche thonière à la senne française dans l'Océan Indien, à travers les séries de captures et d'effort, tout en distinguant les deux modes de pêche (bancs libres et bancs sous DCP). La deuxième partie sera dédiée aux tactiques de pêche à petite échelle : le déroulement d'un coup de senne, les informations fines collectées par les observateurs. Enfin, la troisième partie permettra d'exposer les données « Vessel Monitoring Systems » (VMS) depuis leur collecte, jusqu'à l'analyse descriptive de ces données de trajectoire.

### a) Collecte des données de livre de bord (logbooks)

Le livre de bord est rempli pour chaque jour. Le patron de pêche y indique, entre autres, la localisation (longitude, latitude en degrés-minutes), le nombre de calées, le type de banc sur lequel a (ont) lieu le(s) coup(s) de senne, ainsi que la capture estimée par espèce (fig. 9).

[illegible]

Les positions notées par les patrons des senneurs sont celles d'une calée ou celles de midi pour un jour donné. Le bateau peut parcourir au maximum 260 km pendant une journée (12 h de route à 12 nœuds), donc pendant cette journée, la position du navire peut varier de plus de 2° autour de la position notée dans le livre de bord.

Les livres de bord sont collectés dans les ports de débarquement et une nouvelle ventilation des estimations de prises par espèces est appliquée à partir d'échantillonnage dans les cuves au moment du débarquement.

Les informations collectées par les livres de bord sont utilisées dans les Commissions thonières pour notamment, les calculs de prises par espèces et type de pêche, les calculs d'effort de pêche, de CPUE (Pianet et al., 2006 - IOTC-2008-WPTT-06).

### b) Calées sur bancs libres et calées sous DCP à partir des livres de bord

Le mode de pêche étant noté dans les livres de bord, les séries temporelles historiques (entre 1984 et 2004) du nombre de calées réalisées sous DCP et du nombre de calées réalisées sur bancs libres ont été représentées pour la flottille de senneurs français depuis le début de la pêcherie dans l'Océan Indien (fig. 10). A partir de 1991, un changement a été opéré dans la collecte des données, ce qui a impacté le nombre de calées déclarées sur objet par rapport au nombre de calées déclarées sur banc libre. Il apparaît une forte saisonnalité inter-mensuelle, certaines périodes étant en majorité consacrées à la pêche sur bancs libres, d'autres à la pêche sur DCP.

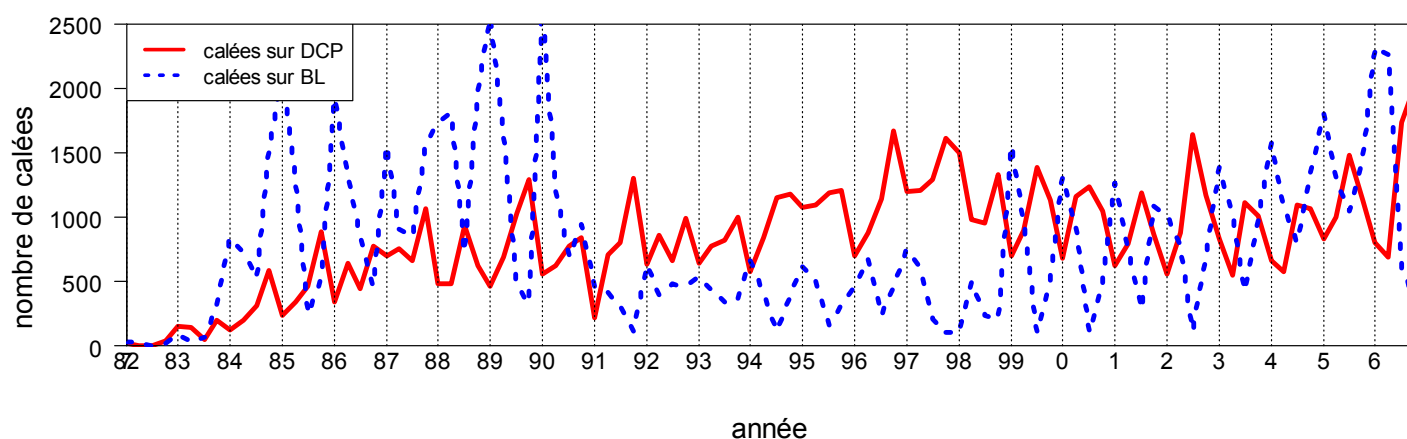


Fig. 10: Nombre trimestriel de calées sur DCP/FAD (rouge) et nombre mensuel de calées sur bancs libres/BL (bleu) entre 1982 et 2006.

La proportion de calées sous DCP a augmenté légèrement entre les années 1980 et le milieu des années 1990, puis décliné jusqu'à nos jours (fig. 11). En 2003 et 2004, le nombre de calées sous DCP et celui sur bancs libres se rééquilibrent, avec une proportion autour 0.5.

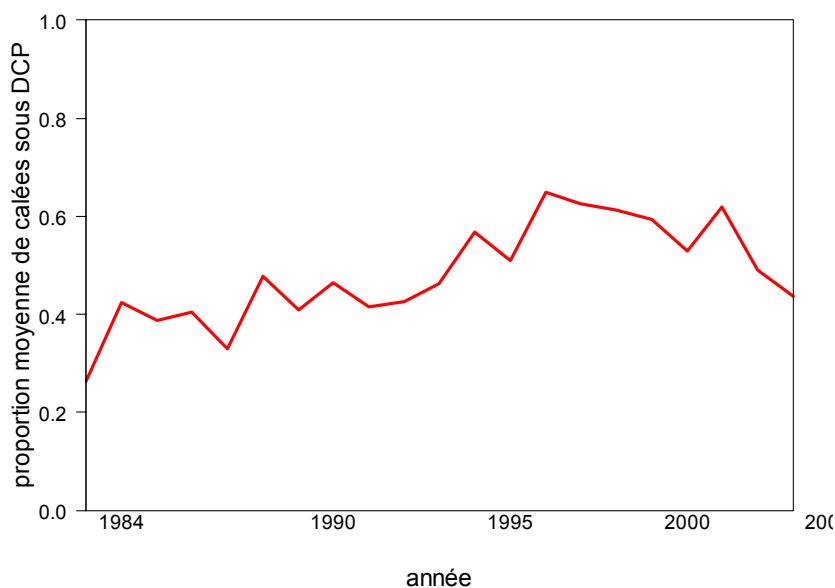


Fig. 11 : Moyenne annuelle de la proportion de calées sous DCP par rapport au nombre de calées total.

Dans les livres de bord, au moins une position du navire est notée pour chaque journée, ce qui permet de représenter les calées (sur DCP et sur bancs libres) en les cumulant par carré de  $1^\circ$  sur  $1^\circ$  (fig. 12).

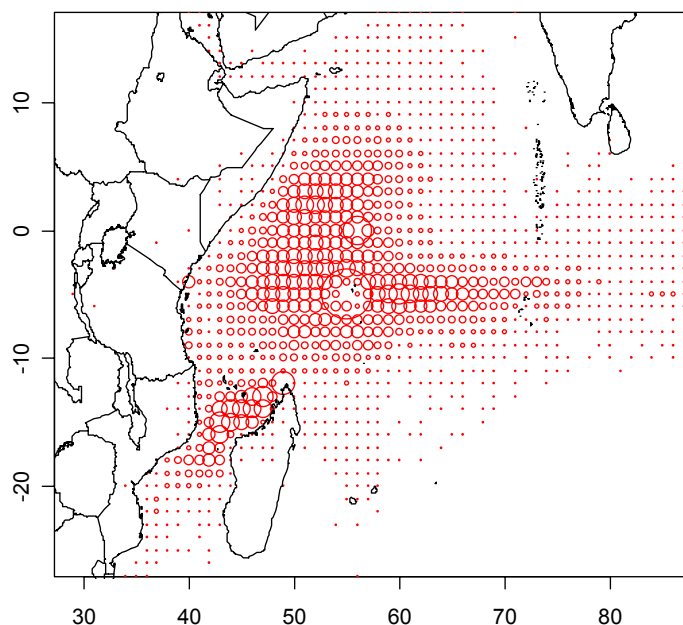


Fig. 12: Carte du nombre de calées cumulé de 1984 à 2004, dans l'Ouest de l'Océan Indien.

Au cours des vingt dernières années, les calées les plus nombreuses se situent dans la zone des Seychelles, ainsi qu'au Nord-Ouest des Seychelles (zone Somalie), à l'est des Seychelles, et au Nord du Canal du Mozambique (fig. 12). L'échantillonnage s'étend sur toute la moitié Ouest de l'Océan Indien tropical : du golfe d'Arabie au Nord, au Sud du canal du Mozambique au Sud, de la côte africaine à l'est, au Sud de l'Inde (zone des Chagos) à l'Est.

L'évolution spatio-temporelle de la probabilité qu'une calée ait lieu sur DCP plutôt que sur bancs libres a été mise en évidence par la cartographie de cartes trimestrielles de 1985 à 2006 par krigeage binomial. Cette étude a fait l'objet d'un article publié dans les Proceedings de la conférence internationale de géostatistique (Walker et al., 2008, Annexe 1). Ce travail a permis de cartographier pour chaque strate spatio-temporelle, la probabilité qu'une calée ait lieu sur DCP, en tenant compte de l'effort d'échantillonnage dans chaque unité d'espace. Initialement, un des objectifs de la thèse était d'appliquer, selon la date et la position, cette probabilité aux calées estimées sur les données VMS, afin d'obtenir la distribution spatiale des calées sur bancs libres et sur DCP en temps quasi-réel (dès la réception des données VMS). Finalement, l'analyse des VMS n'étant pas réalisée en temps réel, la distinction calées sur bancs libres/ calées sur DCP peut se faire a posteriori, à partir des livres de bord actualisés, plutôt sur la base de cartes de krigeage binomial établies sur les livres de bord antérieurs.

### c) Saisonnalité de l'activité de pêche

Les centres de gravité des calées sur DCP pour chacune des années (de 1984 à 2004), aux saisons avril-mai, août-septembre, octobre-novembre sont représentés sur la figure 14.

Ils mettent en évidence une cyclicité saisonnière des centres de gravité de la localisation des coups de pêche sous DCP : ils sont d'abord situés dans le Nord du Canal du Mozambique en avril-mai, puis dans la zone Somalie en août-septembre, enfin dans la zone Nord-Seychelles en octobre-novembre.

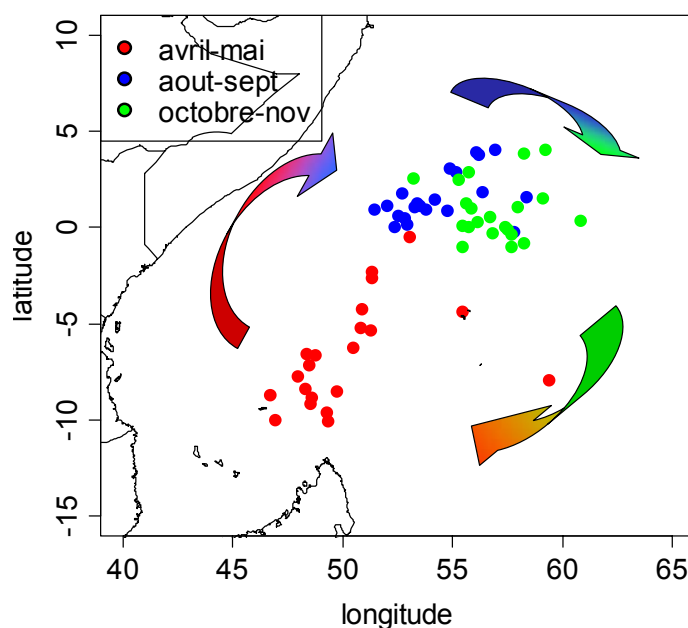


Fig. 13 : Carte des centres de gravité des calées sous DCP de 1984 à 2004, en avril-mai, août-septembre et octobre-novembre, dans l'Ouest de l'Océan Indien.

Une saisonnalité temporelle a été observée pour le nombre de calées sur DCP et le nombre de calées sur bancs libres (fig. 10). Il existe donc aussi une saisonnalité spatiale avec des changements de zone de pêche au cours d'une année (fig. 13).

### d) Séries temporelles des efforts de pêche

Depuis le début de la pêcherie de thoniers senneurs dans l'Océan Indien (1983-1984), les séries temporelles d'efforts et de captures ont pu être calculées et représentées à partir des données de livres de bord.

#### Captures

Les captures par les senneurs européens ont augmenté de 1983 à 2006, atteignant un peu plus de 300 000 t capturées en 2006, alors que le nombre de bateaux total est resté relativement stable depuis la fin des années 1980. Les prises sous DCP sont devenues de l'ordre de deux fois plus importantes que les prises sur bancs libres, à partir de 1995, l'écart entre les courbes se resserrant dans les années les plus récentes (fig. 14).

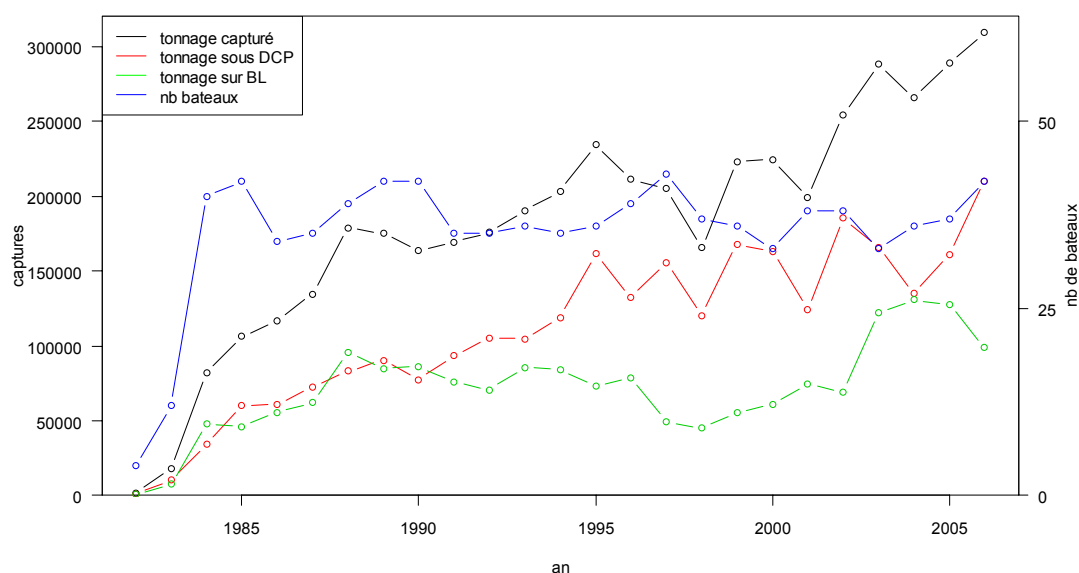


Fig. 14 : Evolution des captures (en tonnes) des senneurs français et espagnols confondus, sur bancs libres et sur DCP.

Les prises par les senneurs français sont plus faibles que celles par les senneurs espagnols (car le nombre de senneurs français est plus faible que le nombre de senneurs espagnols), avec une stagnation des prises depuis 2002, alors que les prises espagnoles ont continué de croître.

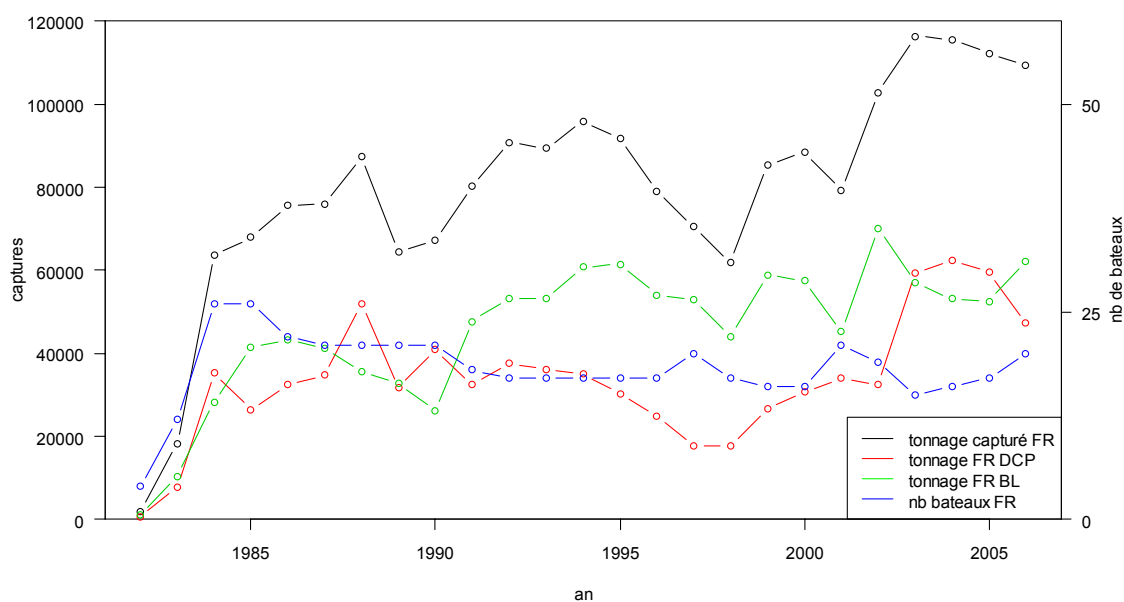


Fig. 15 : Evolution des captures (en tonnes) par mode de pêche, pour la flottille française uniquement.

Le tonnage capturé par les senneurs français est dominé par les captures sur bancs libres depuis 1991, sauf pour les années 2003, 2004, 2005 (fig.15). Les captures sont de l'ordre 110 000 tonnes en 2006, pour la flottille française, dont 50 000 t sur bancs sous DCP et 60 000 t sur bancs libres.

Les efforts calculés sont :

- le nombre de calées par an et par mode de pêche (DCP ou bancs libres (BL)), pour les flottilles française et espagnole.
- le nombre de jour de mer, par mode de pêche, pour la flottille française uniquement.
- le nombre de jour de pêche (heures de recherche convertie en nombre de jours) pour la flottille française uniquement.

### Effort : nombre de calées

Un des calculs d'effort est le nombre de calées (ici représenté par an), calculé pour chaque mode de pêche, bancs libres ou bancs sous DCP (fig.16).



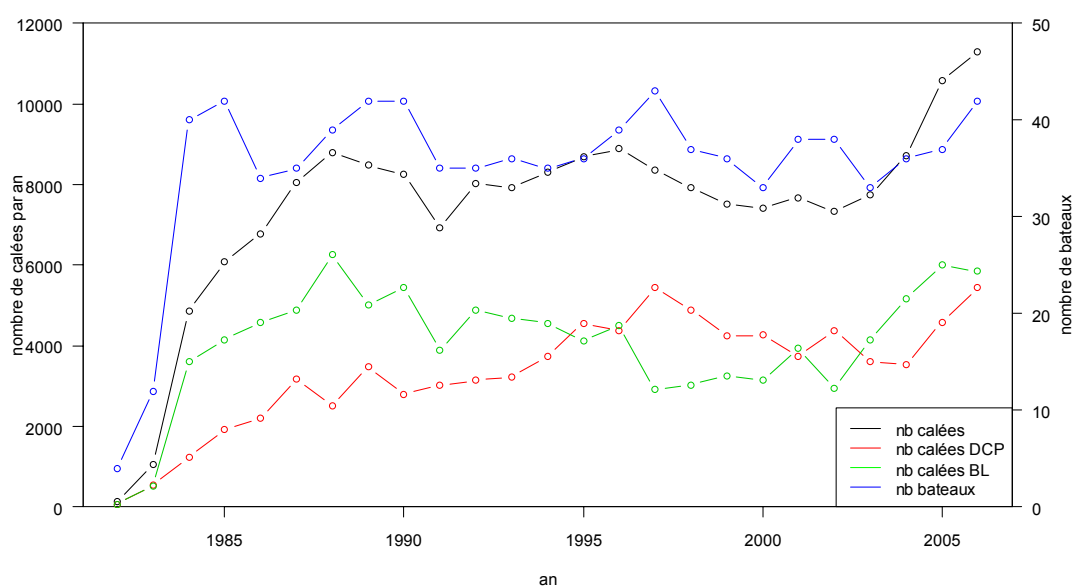


Fig. 16 : Evolution du nombre de calées des senneurs français et espagnols confondus, sur bancs libres et sur DCP.

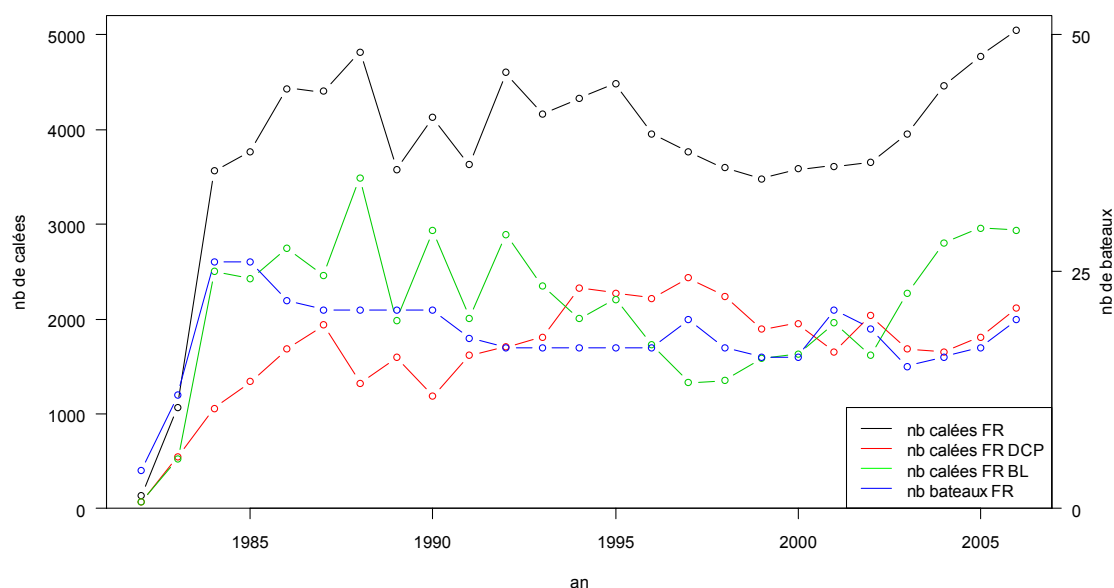


Fig. 17 : Evolution du nombre de calées des senneurs français, selon le mode de pêche (bancs libres ou DCP).

Il apparaît que le nombre de calées par les senneurs français a d'abord été plus important sur les bancs libres, jusqu'en 1994, puis les calées sur DCP ont été plus nombreuses jusqu'en 2002 (fig.17). Cependant ces dernières années (2003 à 2006) ont été caractérisées par un grand nombre de calées sur bancs libres (ce qui est peut-être lié aux grandes concentrations de bancs libres d'albacore de ces années là). Le nombre de calées s'est élevé à un peu plus de 5000 pour l'année 2006.

### Effort : nombre de jours de mer

Le nombre de jours de mer est un des calculs d'effort calculé pour les thoniers senneurs (nombre de jours des marées). L'effort a fortement augmenté entre le début de la pêcherie en 1983 et 1985, puis

décrû progressivement jusqu'en 2005, et a seulement ré-augmenté en 2006 (avec 5500 jours de mer) (fig.18).



Fig. 18 : Evolution du nombre de jours de mer des senneurs français, selon le mode de pêche (bancs libres ou DCP).

### Effort : nombre de jours de recherche (nombre d'heures de recherche traduit en jours)

L'effort en nombre de jours de recherche est calculé de la manière suivante. Il s'agit du nombre d'heures de recherche, c'est-à-dire 13 heures de jour diminuées du nombre d'heures en avaries et du nombre d'heures en pêche, converties en jour (Pianet et al., 2006 - IOTC-2008-WPTT-06). Le nombre d'heures en pêche est estimée à partir du tonnage capturé et de la relation durée d'une calée / captures construite sur certaines données d'observateurs.

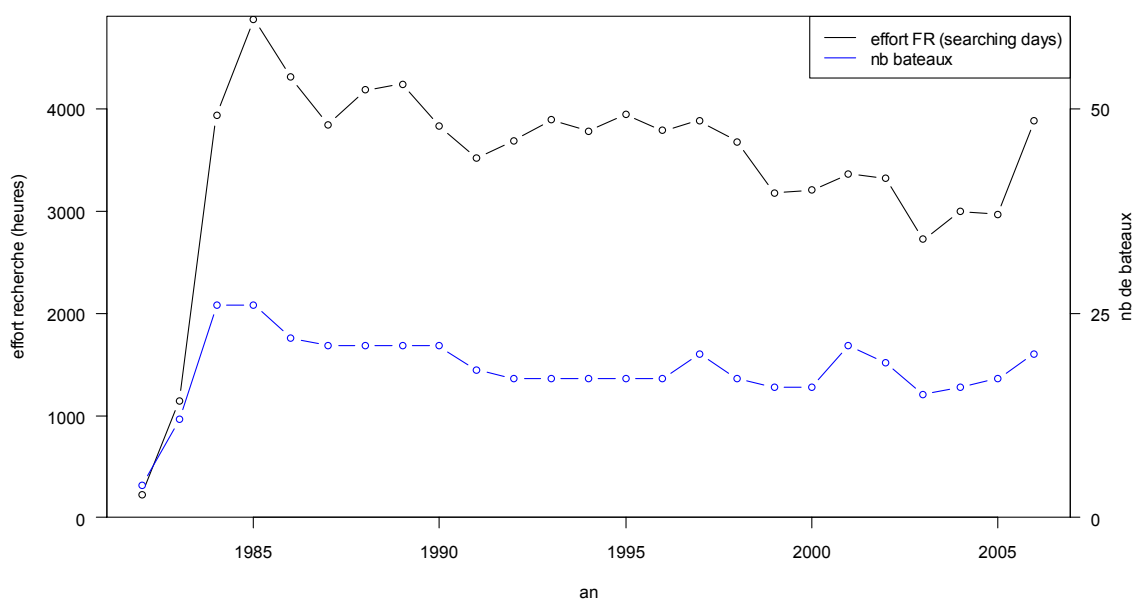


Fig. 19 : Evolution du nombre de jours de recherche (heures de recherche converties en jour) des senneurs français.

Le nombre de jours de recherche suit la même évolution que l'effort en jours de mer, avec un effort de l'ordre de 4000 jours de recherche en 2006 (fig.19).

A partir du contenu des livres de bord, ces efforts de pêche ont pu être calculés, mais de manière peu précise (le nombre d'heures de recherche est approché) et sans quantification spatiale. L'objectif est donc d'améliorer la compréhension de l'activité de pêche avec les données collectées par les Observateurs, et à préciser le calcul d'effort grâce aux VMS.

### **Partie 2. Tactiques de pêche (données « observateurs »)**

#### **a) Collecte des données Observateurs**

Les données « observateurs » dont nous disposons concernent les observateurs embarqués à bord des thoniers senneurs français de l'Océan Indien et font partie du programme de la DCR (« Data Collection Regulation ») de l'Union Européenne débuté fin 2005. Dans ce cadre, l'IRD met en œuvre l'observation d'au moins 10% des navires de la flottille ciblée par an.

Chaque observateur embarqué à bord d'un senneur a pour mission de suivre les activités de pêche du bateau opérant dans la zone intertropicale, pendant toute la durée de la marée, et de recueillir un certain nombre d'informations relatives à l'ensemble des activités du bateau (fig. 20). Il collecte les données de l'activité de jour uniquement, c'est-à-dire :

- les positions du navire dès qu'il y a un changement de cap et/ou de vitesse (au minimum toutes les heures),
- les caractéristiques de la recherche de bancs,
- les caractéristiques générales des calées,
- les paramètres environnementaux,
- les captures et les rejets de thons et d'espèces accessoires par calée.

Les principales variables auxquelles nous nous intéressons sont les positions du navire au cours de ses déplacements, ainsi que les positions et les horaires des calées (positives et nulles).

Les données « observateurs » disponibles correspondent à :

- 6 marées en 2006, effectuées par 4 observateurs (145 jours d'observation).
- 13 marées en 2007, effectuées par 6 observateurs (450 jours d'observation).

**Programme national de collecte des données de base (France)**      Formulaire **A**  
**Route et paramètres d'environnement**

Formulaire de route n°:

Loch matin:

Nom du bateau:

Bateau n°:

Date:

Loch soir:

Nom de l'observateur:

Ligne	Heure			Qua-	Latitude			Longitude			Activité bateau/jour	Vitesse bateau	Température de surface	Vitesse vent	Mode detection	Système observé	Distance	Raison non calée	Formatage															
	h	m	s	drat	g	m	s	g	m	s									B	I	D													
0	0	9	2	6	3	0	6	5	6	1	4	0	4	0	3	4	1	2	2	6	7	2	2	0	7	0	7	0	6	6	0	7	11	22
1																																		
2																																		

**Programme national de collecte des données de base (France)**      Formulaire **B**

Calée n°:

Date :

Nom du bateau :

Bateau n°:

Formulaire route n°:

Ligne route n°:

Nom de l'observateur :

**Caractéristiques de la pêche**

Heure début calée			
h	h	m	m

Heure fin coulisage			
h	h	m	m

Heure fin calée			
h	h	m	m

Profondeur maximale de la senne à la fermeture	
--	--

Raison du coup nul	
--------------------	--

Estimation du banc		
Espèce	taille (t)	P. moy (kg)
Albacore		
Listao		
Patudo		

Utilisation du sonar	
Epaisseur du banc:	
Profondeur moyenne:	
Profondeur début:	
A-t-il été utilisé pendant la calée ?	Oui      Non

Système observé			

**Captures de thons**

Espèce	Cat.	Poids	Curve	Espèce	Cat.	Poids	Curve	Espèce	Cat.	Poids	Curve

Fig. 20 : Formulaire de route (A) et de pêche (B) remplis par les observateurs scientifiques embarqués.

Les données Observateurs offrent une exhaustivité de l'information sur l'activité de pêche, notamment sur le déroulement d'un coup de senne. En revanche, les autres activités (recherche, route, arrêts, manœuvre de DCP) sont renseignées plus inégalement selon les observateurs. Les informations collectées par les Observateurs sur les activités des navires peuvent apporter des informations « a priori » sur le comportement des pêcheurs pour un modèle qui sera appliqué aux trajectoires VMS.

## b) Déroulement d'un coup de senne : étapes d'une calée moyenne d'un thonier senneur français dans l'Océan Indien

Les étapes d'un coup de senne (ou calée) d'un thonier senneur tropical français moyen sont les suivantes (fig. 21).

Après avoir repéré un banc de thon aux jumelles, et/ou au sonar et au sondeur latéral, l'alerte est donnée de l'imminence du coup de pêche. Le **skiff est largué** entraînant avec lui une extrémité du filet (appelé « senne » d'une longueur de 1500 m sur 300 m de profondeur). La coulisse, c'est-à-dire le câble passant entre les anneaux qui maintiennent la partie la plus basse de la senne et qui servira à fermer le fond du filet, est déroulée. Cette étape constitue un point de non-retour : toutes les étapes jusqu'au filage sont obligatoires (il n'est pas possible de ramener la senne à bord par un autre moyen).

Le navire encercle le banc, en s'aidant du sonar pour suivre les déplacements du banc de thon, pendant que le skiff maintient l'autre extrémité de la senne (**filage**). A la fin de l'**encerclement** du banc, les câbles de la partie de la senne accrochés au skiff sont reliés aux poulies du navire, puis décrochés du skiff.

Le **coulissage** commence : les deux extrémités de la coulisse s'enroulent sur deux treuils. Le coulissage entraîne le boursage, c'est-à-dire la fermeture progressive de la partie basse de la senne, jusqu'à ce que les anneaux soient regroupés au fond, puis remontés sur le côté bâbord du navire. Le

filet est maintenant complètement fermé. Une aussière est déroulée et amarrée entre le skiff et l'arrière du navire. Celle-ci va permettre au skiff de tirer sur le navire lors du virage de la senne et de le faire tourner en permanence, afin de garder la senne ouverte et ainsi, de permettre au poisson de pouvoir nager librement jusqu'à la fin.

L'étape suivante est le **virage de la senne**. La senne passe dans le power-block (grosse poulie au bout d'un mât maintenu par deux câbles latéraux) et rangée au fur et à mesure dans l'espace à l'arrière du pont « le parc à senne ». La partie haute de la senne, munie de lièges (5000 environ) permettant la flottaison du filet, est arrimée côté tribord, alors que la partie basse, la « chaîne » à laquelle sont accrochés les anneaux, est arrimée côté bâbord. Le rangement de la senne se fait de manière à ce que celle-ci puisse se dérouler sans s'emmêler lors du largage suivant. Le virage de la senne se finalise par la formation de la poche (il s'agit de la partie de filet accrochée au skiff au début du coup de pêche) dans laquelle se concentre le poisson capturé. Le filet constituant la partie profonde de la poche est tirée sur le pont grâce au rouleau de lisse et à un système de treuillage permettant au poisson d'arriver jusqu'à la surface de l'eau.

Les étapes du largage du skiff au virage constituent la part fixe de la durée d'une calée, qu'il y ait ou non du poisson dans le filet.

Le **salabardage** peut commencer. La salabarde, qui est une grande « épuisette » pouvant contenir entre 3 et 6 tonnes de poisson, est plongée dans la poche, en longeant le filet, puis, lorsqu'elle est pleine, est remontée par un système de câbles. Le poisson est transporté jusqu'à la goulotte (large ouverture permettant le passage du poisson entre le pont et le faux pont), la salabarde s'ouvre par le fond pour libérer le poisson. Le temps de salabardage dépend de la quantité de poisson capturé (environ 100 tonnes/heure).

Après le passage par la goulotte, le poisson défile sur le tapis roulant, où les marins effectuent le tri, en enlevant les poissons non commercialisés. Au bout du tapis roulant, les thons sont dirigés vers des cuves d'une contenance de 50 à 80 tonnes et congelés dans la saumure (mélange d'eau de mer et de sel, à température négative, environ -15°C).

Les rejets sont en général composés de petits thonidés et d'espèces accessoires (daurades coryphènes, balistes, sélaciens etc.) qui sont jetés sur un second tapis roulant, placé au dessus du tapis principal et les déverse directement à la mer, par une trappe placée sur le côté avant tribord.

Lorsque toute la poche est vidée, la poche est rangée dans le parc puis le skiff est remonté sur la rampe arrière du navire.

Le navire est prêt pour un nouveau coup de senne.



Fig. 21 : Déroulement d'un coup de senne avec durée de chaque étape en minutes. Le navire est immobile pendant au moins 1h30. Le salabardage dure un temps variable supplémentaire de l'ordre de 1h pour 100 tonnes pêchées.

Une des raisons principales à l'origine de l'augmentation de la durée d'une calée, est l'usure des équipements : avec le vieillissement de la senne et des machines hydrauliques, il devient plus difficile d'accélérer l'encerclement, le virage de la senne. Le temps d'une calée nulle est donc allongé avec l'âge d'un senneur.

En outre, depuis l'utilisation du Scanmar (boîtier calculant la profondeur de la senne pendant un coup de senne), certains patrons se sont rendus compte que le filet ne coule pas très bien si l'encerclement est trop rapide. Même une fois l'encerclement terminé, la senne ne coulera pas plus. Ils ont donc considéré qu'il est plus judicieux d'encercle le poisson à une vitesse un peu moindre, afin d'obtenir une profondeur de la senne la plus grande possible.

Avant ce constat et lorsque le bateau était neuf, la part fixe d'une calée (du largage au virage) pouvait être réalisée en une heure (Com. Pers. P. Drévilion). La seule étape que les pêcheurs souhaitent réaliser le plus rapidement est le coulissage, afin d'éviter que le poisson ne plonge et ne s'échappe par le bas du filet.

La vitesse du navire est donc rapide (environ 10 nœuds) en début de calée, le temps de l'encerclement, puis la vitesse est nulle et dépend de la dérive (vitesses du courant et du vent). Le bateau reprend de la vitesse dès la fin du rangement, juste avant que le skiff ne remonte à bord.

En cas de mauvais temps (vent, pluie, houle), le virage de la senne prend plus de temps, en particulier s'il y a beaucoup de courant, le filet risque de s'emmêler.

La méthode de largage du skiff, et donc de la senne est différente selon le type de banc. En effet, pour un banc libre, le largage du skiff se fait selon le sens de déplacement de la matte suivi au sonar et le sens de la dérive. Au contraire, pour un banc sous épave, la vedette rapide est mise à l'eau pour maintenir l'épave pendant l'encerclement, puis pendant le coulissage, emmène l'épave près de la

bouée marquant le milieu de la senne. Enfin, la vedette sort de la senne avec l'épave au début du virage de la senne.

La poursuite des bancs se fait à vue (ou aux jumelles), c'est pourquoi les calées n'ont lieu que de jour (ou juste avant le lever du jour, quand le banc ne se déplace pas). La pêche à la senne est donc une activité exclusivement diurne.

### **c) Analyse exploratoire des données**

La campagne de collecte de données Observateurs ayant débuté fin 2005, nous nous intéressons aux données collectées en 2006 et 2007.

#### Couverture spatiale

La couverture spatiale des données collectée par les observateurs de 2006 et 2007 couvre une large partie de la moitié Ouest de l'Océan Indien, à partir de la zone des Seychelles (fig. 22). Les calées observées sont réparties sur l'ensemble de la zone échantillonnée par les Observateurs.

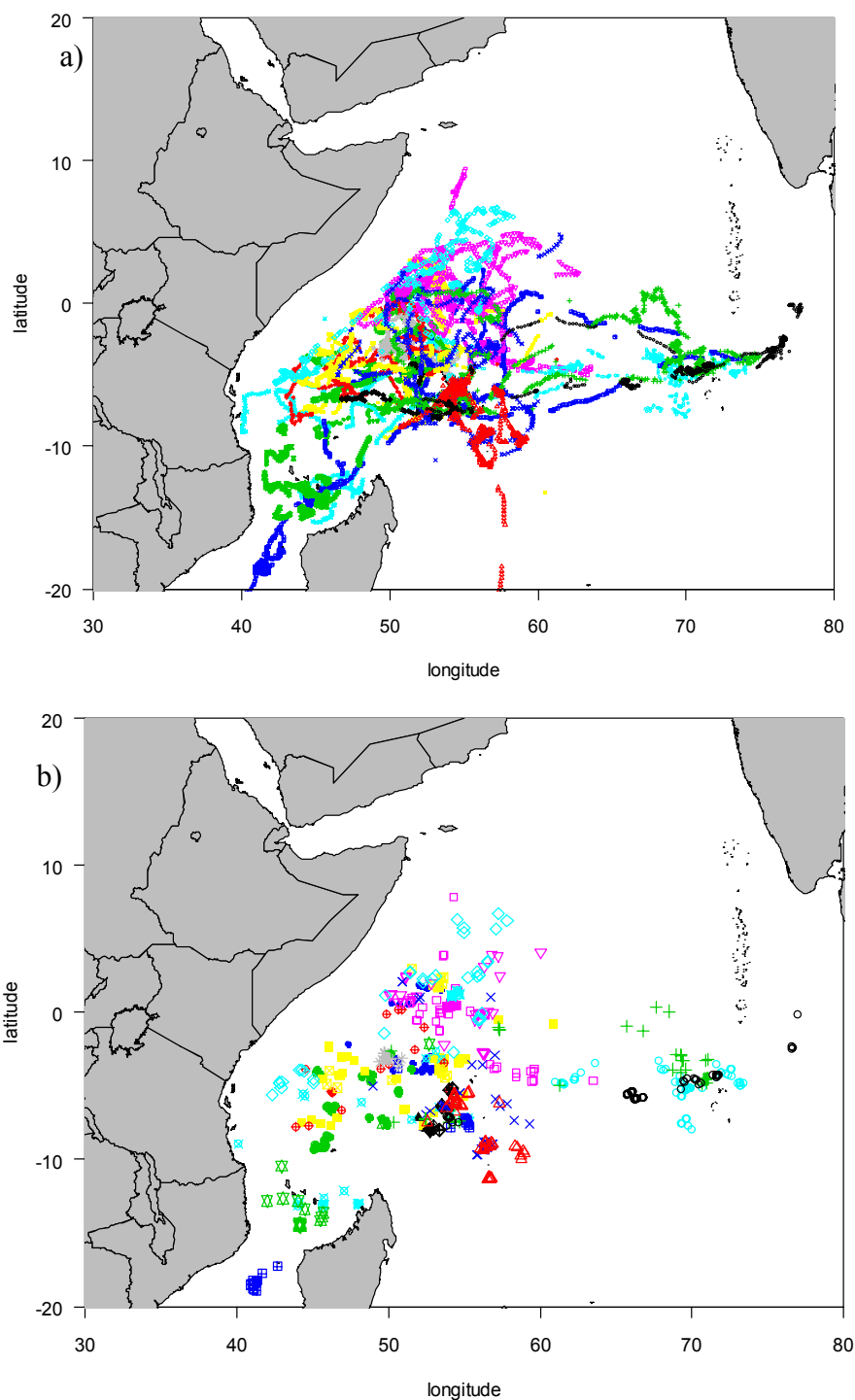


Fig. 22: (a) Couverture spatiale de toutes les positions notées par les observateurs, pendant les marées de 2006-2007. Chaque symbole (et couleur) correspond à une marée observée. (b) Positions des calées notées par les observateurs pendant les 19 marées observées de 2006-2007.

### Couverture temporelle

Les données Observateurs se répartissent assez inégalement sur 2006 et 2007 (Table 3). Plusieurs mois n'ont peu ou pas été observés en 2006 : seuls les mois de janvier, mars, juin et décembre 2006 ont été réellement échantillonnés. Le nombre de jour observés en 2007 est près de 5 fois plus important, avec une assez bonne répartition de l'observation entre les mois de l'année.



Table 3 : Nombre de jours observés par mois, pour 2006 et 2007.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
2006	18	0	22	0	0	26	8	0	0	0	1	31	106
2007	16	0	40	49	51	48	28	58	33	43	52	58	476

### Nombre de jours des marées avec observateur

Pour chaque marée avec un observateur à bord, le nombre de jours de mer a été calculé (fig. 23) : la durée des marées avec observateur s'avère plutôt hétérogène, le minimum étant de moins de 10 jours à un maximum de plus de 50 jours.

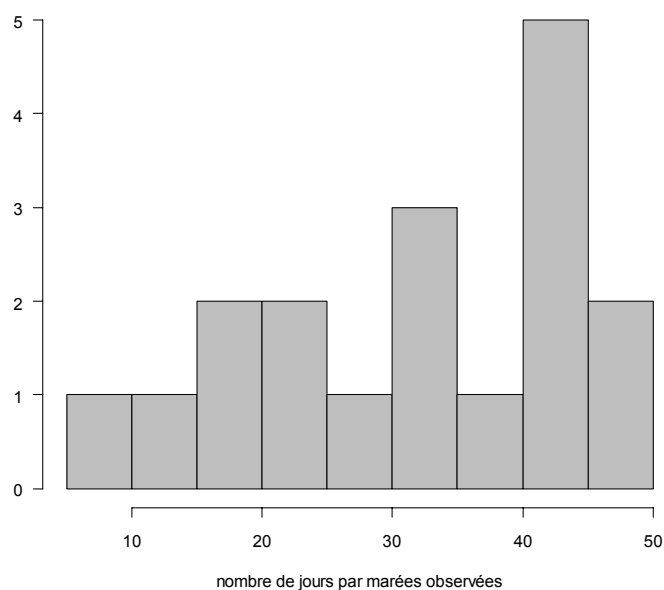


Fig. 23 : Histogramme du nombre de jours par marée avec observateur.

### Calées

Le nombre de calées observées est de 633 au total sur 19 marées observées d'une durée de 4 à 45 jours. Sur l'ensemble des marées, 582 jours ont été observés. Les calées se répartissent entre calées nulles (34%), sans poisson capturé, et calées positives (66%) avec une capture de poisson. De plus, 73% des calées observées ont été réalisées sur bancs libres et 27% sur bancs sous DCP (Table 4).

Table 4 : Nombre de calées par mode et selon la capture.

	Calées nulles	Calées positives	Total
Calées sur bancs libres	193 (31%)	267 (42%)	460 (73%)
Calées sur DCP	20 (3%)	153 (24%)	173 (27%)
Total	213 (34%)	420 (66%)	633 (100%)

### Nombre de calées par jour

Le nombre de calées par jour est nul dans 47% des jours et positif dans 53% des jours observés. Dans 46% des jours où le nombre de calées est positif, une seule calée a été réalisée (fig.24).

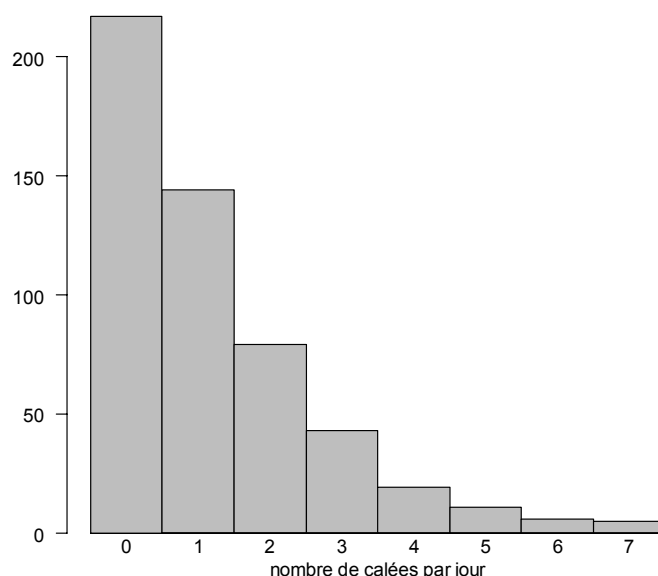


Fig. 24 : Histogramme du nombre de calées par jour.

### Enchaînement des coups de pêche

L'enchaînement des calées au fil des jours d'une marée est propre à chaque marée, mais quelques schémas sont communs à plusieurs marées. La figure 25 présente trois exemples de marées, où les calées sont symbolisées dans leur ordre de réalisation (avec les distinctions bancs libres / DCP et succès/échec). Il apparaît que certaines marées sont quasiment exclusivement consacrées à la pêche sur un de deux modes (bancs libres ou DCP) comme c'est le cas pour les marées n°2 et n°3, alors que d'autres comportent autant de calées sur chacun des deux modes (marée n°1). La plupart des calées nulles sont aussitôt suivies d'autres calées : une observation d'un banc de thon est rarement « abandonnée ». Les calées ont lieu par salves pendant plusieurs jours d'affilée, entre lesquelles il n'y a pas de pêche (de 2 à 5 jours). Ces périodes sans pêche correspondent à des changements de zone : lorsqu'il n'y a plus d'apparences (bancs de thon, oiseaux, épaves) dans la zone initiale, les navires font route vers une nouvelle zone. Pendant la route, le navire continue sa recherche mais ne suit pas forcément d'apparences avant d'arriver dans une nouvelle zone propice où les apparences seront fréquentes.



Fig. 25 : Enchaînement des calées au cours de trois exemples de marées. Chaque droite verticale en pointillés représente la limite entre deux jours consécutifs. Les calées positives sont symbolisées par des triangles et les calées nulles par des ronds. Les calées sur bancs libres sont en noir, les calées sur DCP en rouge.

### Heures des calées

Les heures de début de calée ont été calculées relativement à l'heure de lever du soleil, et il apparaît que, quelque soit le mode de pêche, les calées peuvent avoir lieu à n'importe quel moment de la journée (occurrences dans toutes les tranches d'heures). Toutefois, les occurrences de calées sur DCP décroissent avec l'avancement dans la journée, alors que les occurrences de calées sur bancs libres ont lieu plus uniformément dans la journée (fig. 26).

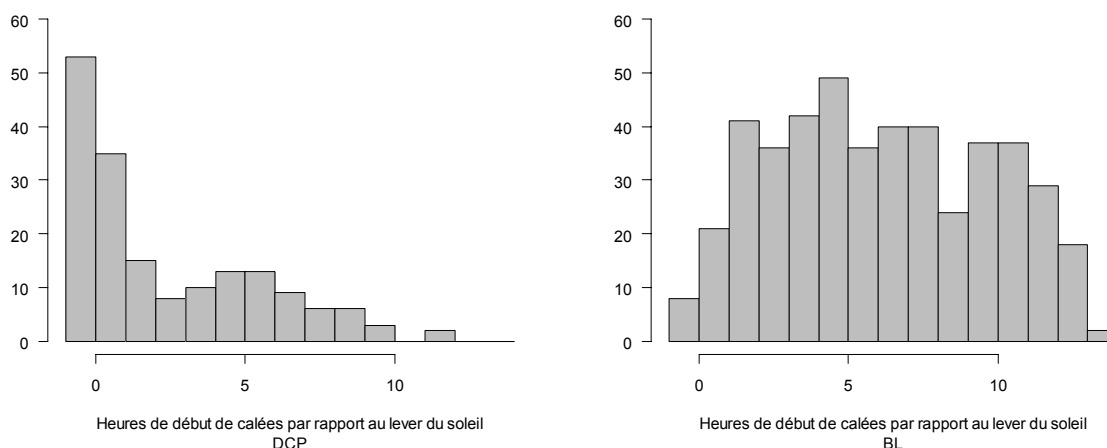


Fig. 26 : Histogramme des heures de début de calées par rapport au lever du soleil (heure égale à zéro), pour les calées sur DCP et les calées sur bancs libres.

### Apparences (ou systèmes observés)

On appelle apparence ou système observé (cf. glossaire), toute perception visuelle de la présence possible ou avérée de thon. Il peut s'agir d'un banc de thon (matte, balbaya, sardara, brisant), de thons en profondeur, d'oiseaux, d'épave balisée ou non, de charogne, d'odontocètes (dauphins, cachalots), de mysticètes (baleines), de requins, ou de requins baleine.

Sur 582 jours observés, 80 (14%) se sont déroulés sans observations de systèmes, et 502 (86%) avec observations de systèmes. Ceci signifie que ces jours sans observations d'apparences, malgré la recherche (au radar et aux jumelles) ont été des jours où le navire a fait route directe sans se détourner

vers des apparences. Cette activité de route avec recherche infructueuse n'est pas notée directement par les observateurs, mais peut être estimée sur les trajectoires fines des navires.

Lors des pêches sous DCP, les observateurs notent rarement s'il s'agit d'un objet appartenant au navire, ou d'un objet trouvé. Il n'a donc pas été possible de tester la trajectoire des navires précédant un coup de pêche, selon cette distinction. Or, d'après les observations de terrain, les navires ont le même comportement de recherche pour un banc libre et pour un objet trouvé, alors que la trajectoire devrait être plus rectiligne pour un objet appartenant au navire. La trajectoire ne permettrait donc pas de faire la distinction « pêche DCP par rapport à la pêche sur bancs libres », mais seulement d'approcher la distinction « pêche sur DCP propre par rapport à la pêche sur bancs libres ou sur DCP trouvé ». Une difficulté s'ajoute par le fait que les navires font souvent route vers un DCP pendant tout ou partie de la nuit précédant la tentative de pêche sous un DCP.

### Arrêts en mer (hors pêche)

Un senneur peut s'arrêter en mer pour diverses causes (hors pêche et hors avaries), lorsqu'il est en dérive près d'un banc ou d'un objet flottant, à la cape (à cause de mauvaises conditions météorologiques), en transbordement en pleine mer, en activité de pose, de modification d'une épave, ou de récupération d'une épave propre ou étrangère.

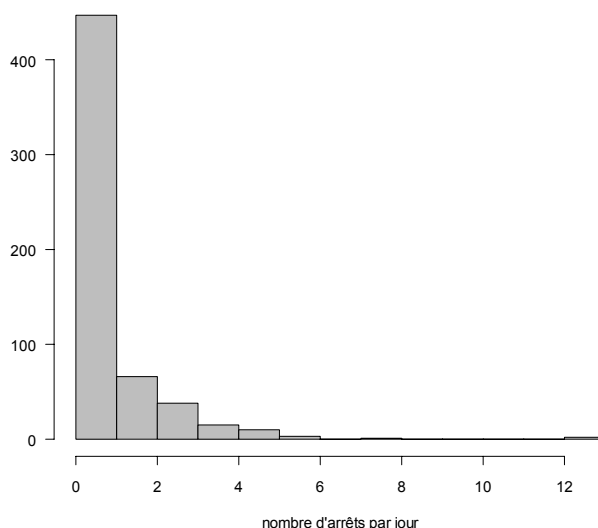


Fig. 27 : Histogramme du nombre d'arrêts par jour.

Sur 582 jours observés, des arrêts ont eu lieu dans 50% des jours observés (295 jours) : les arrêts sont donc très fréquents (fig. 27). En revanche, sur l'ensemble des activités notées (plus de une par heure), le nombre d'arrêts notés ne représente que 5% des activités. Les arrêts sont donc une activité fréquente mais de courte durée.

### Avaries

Sur l'ensemble des 582 jours observés, il y a eu 19 jours (3%) avec au moins 1 avarie. Sur ces 19 cas, 12 ont duré 1h ou moins, 5 avaries ont duré entre 2h et 5h, 2 avaries ont duré toute la journée. Les avaries sont donc anecdotiques, mais selon leur gravité peuvent prendre beaucoup de temps.

Les arrêts (hors pêche) et les avaries sont plus ou moins bien reportés sur les notes des observateurs, surtout lorsqu'il s'agit d'événements d'une durée très courte.

### Activités

L'activité du navire est reportée à chaque mention de la position du navire de jour, au moins une fois par heure, sinon à chaque changement de vitesse ou de cap. L'activité la plus fréquemment notée est la recherche (75%), dès que les marins sont postés aux jumelles et devant le radar, qu'il y ait des apparences en vue ou non (fig. 28). Toutes les activités d'arrêt (dérive, transbordement, manœuvre de DCP) ont été regroupées et constituent 5% des activités notées. L'activité pêche regroupe les notes de début et de fin de pêche, ce qui correspond à 11% des activités notées. Cependant, pendant la pêche qui dure plus d'une heure, l'observateur est occupé à remplir les autres formulaires et note moins d'une position par heure. Enfin, l'activité « route » notée par les observateurs (9% des activités) correspond uniquement aux tronçons de jour sans recherche (c'est-à-dire sans surveillance aux jumelles ou au radar), essentiellement au départ et à l'arrivée du port.

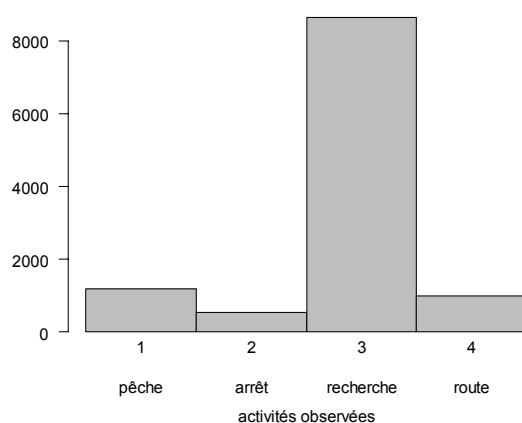


Fig. 28 : Histogramme de la répartition des activités (pêche, arrêt, recherche, route) notées par les observateurs.

### **d) Relation durée de la calée / capture**

Parmi ces quatre activités, l'activité « pêche » est particulièrement détaillée par les Observateurs, notamment la durée et le tonnage des calées.

### Durées des calées

La distribution de la durée des calées varie en fonction du mode de pêche (banc libre ou banc sous DCP). Pour l'ensemble des calées, la durée moyenne des calées est de deux heures, alors que la moyenne est légèrement inférieure à 2h pour les calées sur bancs libres et de 2h15 pour les calées sur bancs sous DCP (fig.29).

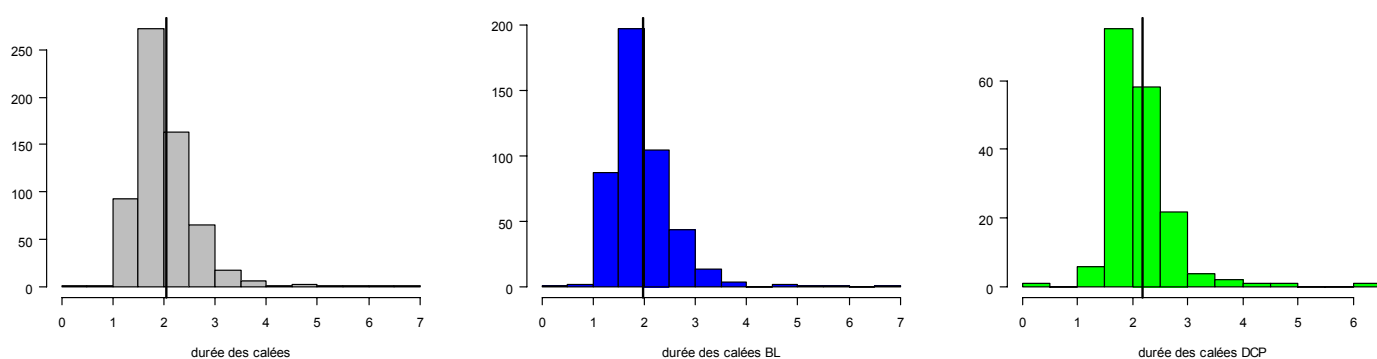


Fig. 29 : Histogrammes de la durée des calées pour l'ensemble des calées (en gris), pour les calées sur bancs libres (en bleu) et pour les calées sur bancs sous DCP (en vert). La barre verticale noire indique la moyenne des durées.

En ce qui concerne uniquement les calées nulles (sans prise de poisson), la moyenne de la durée des calées est plus faible pour toutes les calées, de l'ordre de 1h40, quelque soit le mode de pêche (fig. 30). Il est important de noter que la majorité des calées nulles ont lieu sur bancs libres. Les calées nulles durent rarement plus de 2h.

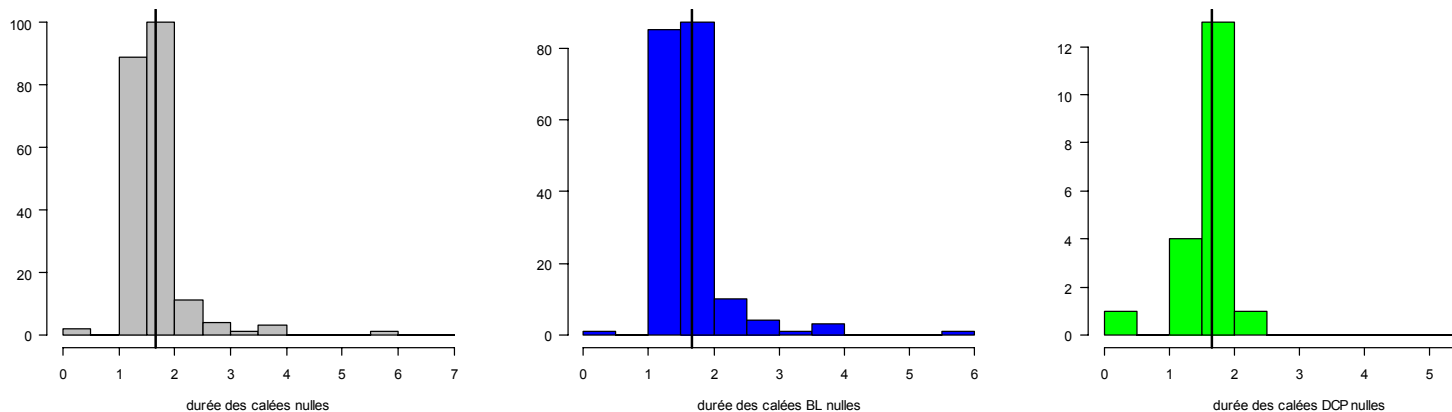


Fig. 30 : Histogrammes de la durée des calées nulles pour l'ensemble des calées nulles (en gris), pour les calées nulles sur bancs libres (en bleu) et pour les calées nulles sur bancs sous DCP (en vert). La barre verticale noire indique la moyenne des durées.

Il n'y a pas de différence notable entre la durée des calées positives sur bancs libres et celle des calées sur DCP (fig. 31).

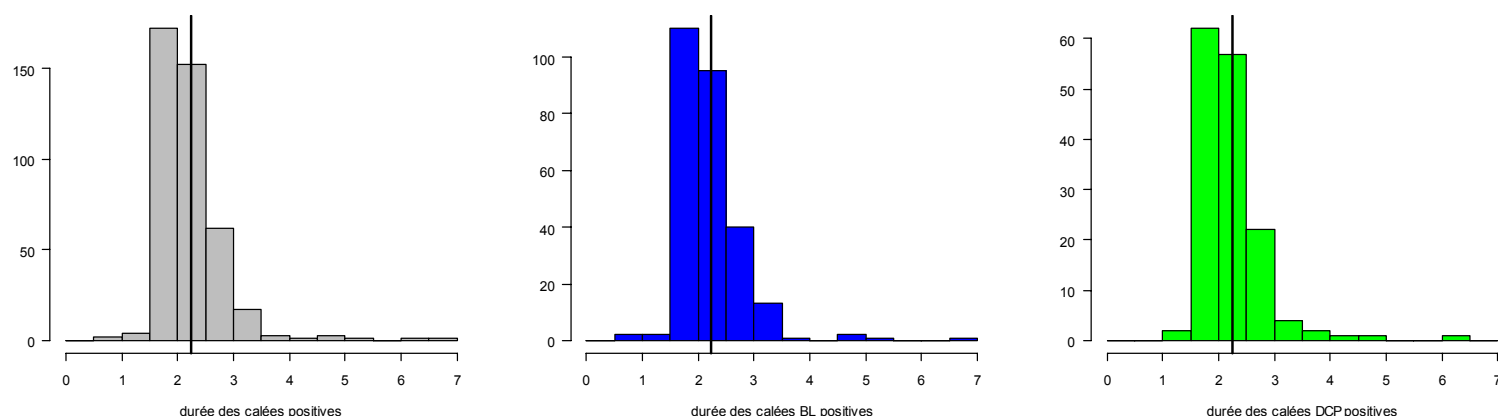


Fig. 31 : Histogrammes de la durée des calées positives pour l'ensemble des calées positives (en gris), pour les calées positives sur bancs libres (en bleu) et pour les calées positives sur bancs sous DCP (en vert). La barre verticale noire indique la moyenne des durées.

Les observateurs ont donc noté que 70% des calées ont une durée comprise entre 1h30 et 2h30 (16% des calées durent plus de 2h30 et 13% des calées durent moins de 1h30), et 97% des calées durent au plus 3 heures et demi. Les calées nulles sont légèrement plus courtes que les calées positives.

### Tonnage des calées positives

Le tonnage des calées positives est en moyenne de 24 tonnes par calée (27 tonnes/calée pour les calées sur bancs libres et 19 tonnes/calée pour les calées sur DCP). La distribution est similaire quelque soit le mode de pêche (banc libre ou banc sous DCP) (fig.32).

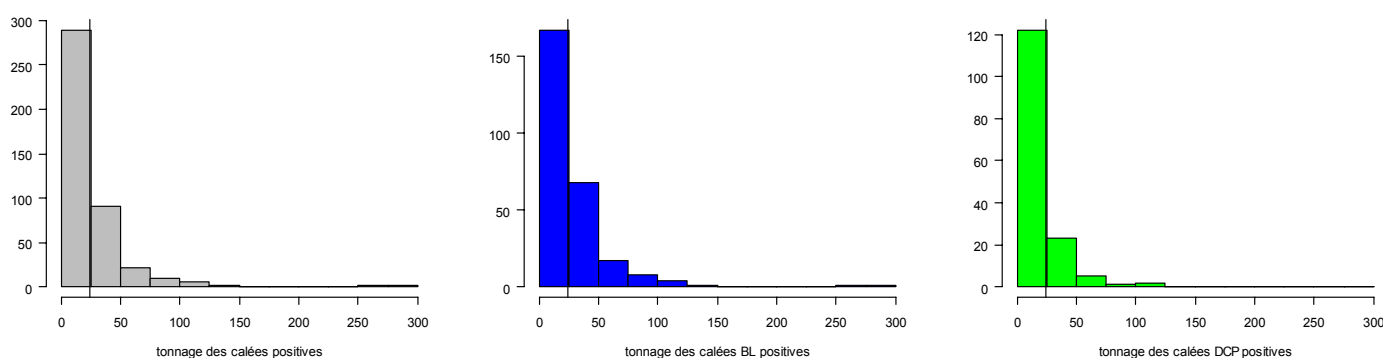


Fig. 32 : Histogrammes du tonnage des calées positives pour l'ensemble des calées positives (en gris), pour les calées positives sur bancs libres (en bleu) et pour les calées positives sur bancs sous DCP (en vert). La barre verticale noire indique la moyenne des durées.

Le tonnage de 95% des calées les plus faibles ne dépasse pas 55 tonnes.

### Relation durée de la calée / capture

La relation entre les durées des calées et les tonnages associés est utilisée dans le calcul actuel de l'effort de pêche (Chapitre 1, partie 3, b) pour estimer la durée d'une calée à partir du tonnage noté dans le livre de bord par le patron de pêche. Les durées des calées sont ensuite déduites de la durée du jour pour calculer le nombre d'heures de recherche comme effort de pêche. Il s'agit ici de représenter

le nuage de points entre les variables « durée de la calée » et « tonnage » pour les calées notées par les observateurs de 2006 et 2007. Pour l'ensemble des calées, le nuage de points est assez concentré pour des durées de calées entre 1h30 et 3h et pour des tonnages inférieurs à 50 tonnes (fig. 33). Le coefficient de détermination de la régression est 0.29, alors que pour les calées positives uniquement, le coefficient de détermination est de 0.25 : les régressions linéaires ne sont donc pas représentatives du croisement des données de durées et de tonnages des calées.

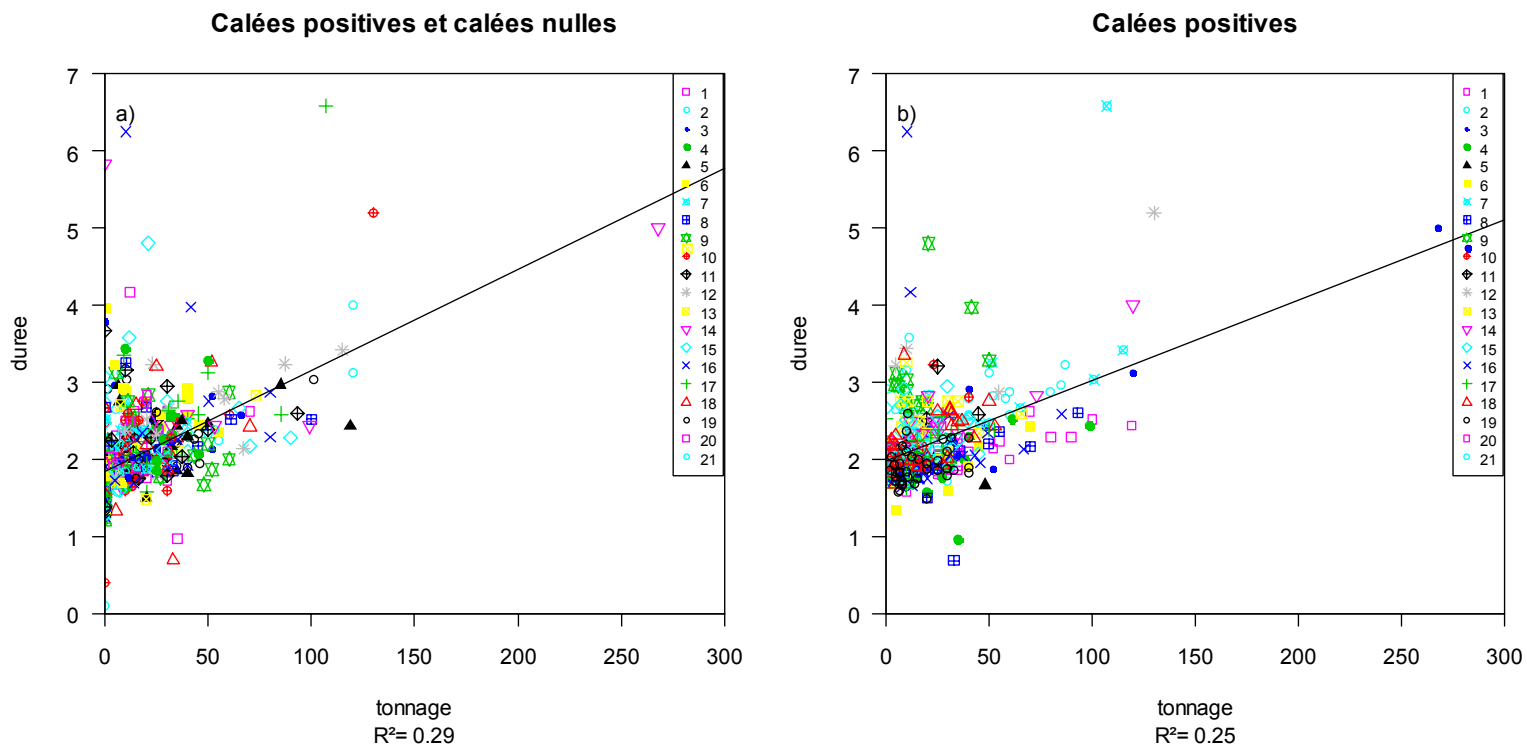


Fig. 33 : Nuage de points des durées de calées en fonction des tonnages pour l'ensemble des calées (a), et pour les calées positives seulement (b). Les symboles représentent les différentes marées observées. Les régressions linéaires sont les suivantes : (a)  $\text{durée} = 1.83 + 0.01 \cdot \text{tonnage}$ , et (b)  $\text{durée} = 1.98 + 0.01 \cdot \text{tonnage}$ .



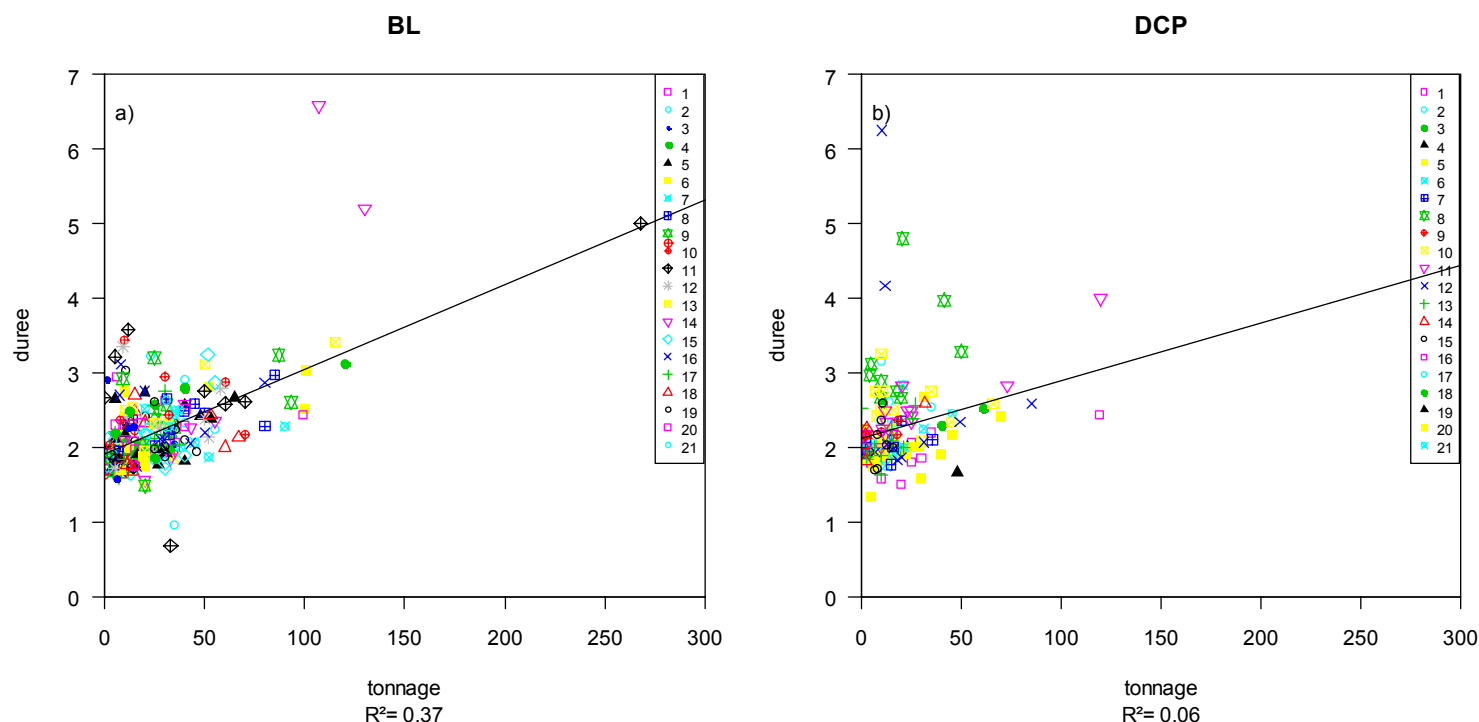


Fig. 34 : Nuage de points des durées de calées en fonction des tonnages pour les calées sur bancs libres et pour les calées sur DCP. Les symboles représentent les différentes marées observées. Les régressions linéaires sont les suivantes : (a) Bancs Libres :  $\text{Durée} = 1.91 + 0.01 \cdot \text{tonnage}$ , et (b) Bancs sous DCP :  $\text{Durée} = 2.11 + 0.007 \cdot \text{tonnage}$ .

Les nuages de points des durées et tonnages des calées ont été représentés en distinguant les calées sur bancs libres des calées sur DCP (fig. 34). Les deux nuages de points sont assez diffus et les régressions ne sont pas très pertinentes, en particulier pour la relation durée/tonnage des calées sur DCP ( $R^2 = 0.06$ ).

Les mêmes nuages de points ont été tracés en enlevant les valeurs extrêmes, en extrayant uniquement les calées durant moins de 3h et demie (ce qui représente 97% des calées), et d'un tonnage inférieur à 55 tonnes (ce qui représente 95% des calées). Au total, 90% des calées positives sont représentées (fig. 35). Les régressions linéaires ne sont pas pertinentes ( $R^2 < 0.1$  pour les calées sur bancs libres et celles sous DCP, avec des p-values significatives).

La relation entre la durée d'une calée et le tonnage associé n'est, par conséquent, pas exploitable, notamment pour déduire de la détection des actions de pêche sur les trajectoires, la durée des calées et les captures associées selon le mode de pêche.

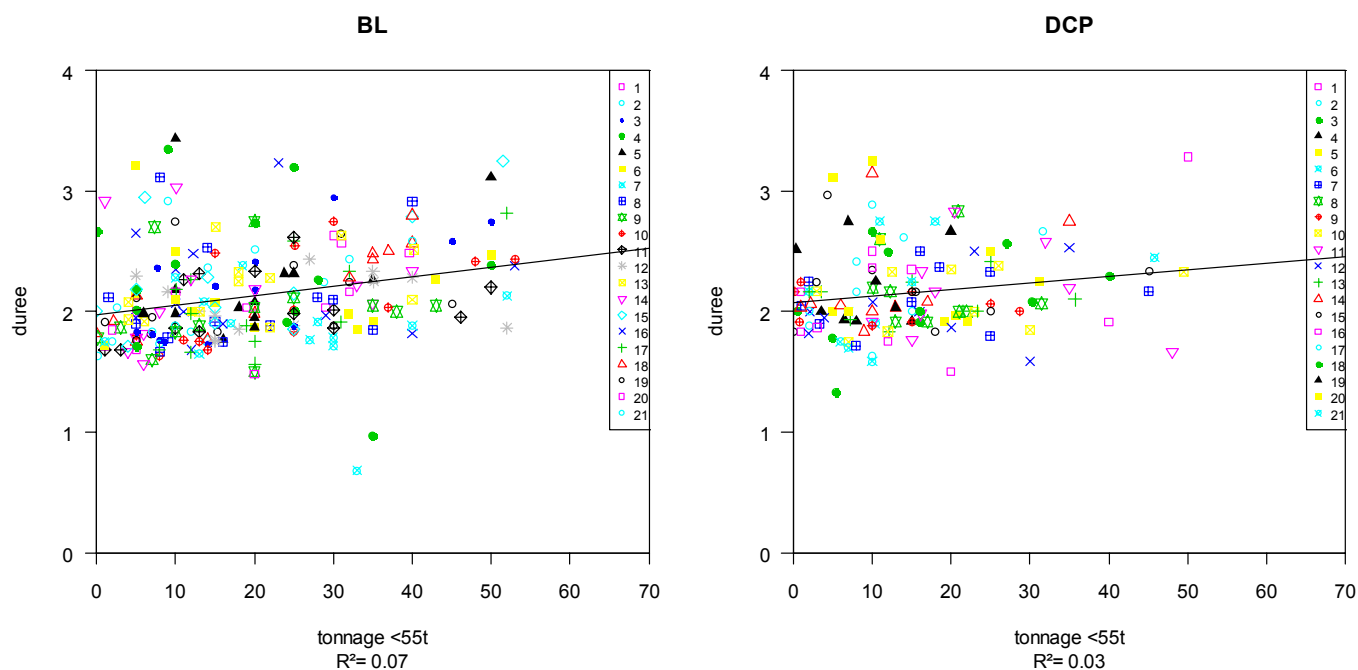


Fig. 35 : Nuage de points des durées de calées en fonction des tonnages pour les calées sur bancs libres et pour les calées sur DCP, uniquement pour les calées d'une durée inférieure à 3h et demie, et d'un tonnage inférieur à 55 tonnes. Les symboles représentent les différentes marées observées. Les régressions linéaires sont tracées pour (a) les Bancs Libres et (b) les Bancs sous DCP.

Bien qu'elles ne représentent que 10% de la flotte, les données Observateurs permettent d'appréhender le déroulement de l'activité de pêche et l'enchaînement des calées des thoniers senneurs. Ces informations seront très utiles lors la construction du modèle appliqué aux VMS pour détecter les calées sur ces trajectoires.

### Partie 3. Analyse descriptive des trajectoires de navires (données VMS)

#### a) La collecte des données Vessel Monitoring Systems (VMS)

Le système de récolte de données VMS fonctionne de la manière suivante (fig. 36) :

- Chaque navire est équipé d'une balise Argos/GPS qui envoie aux satellites des signaux comprenant les localisations (position GPS) et des données relatives aux navires (immatriculation des navires, date, vitesses et caps instantanés).
- Les satellites récupèrent les signaux, les stockent à bord et les retransmettent aux antennes terrestres.
- Les antennes transmettent par voie terrestre les messages jusqu'au centre de traitement informatique de CLS. Le centre de traitement collecte toutes les données, les traite puis les transmet aux utilisateurs (les acteurs institutionnels, les armements).



Fig. 36 : Schéma de transmission de la donnée de position GPS (points rouges) par le système VMS.

Ces données ont d'abord été collectées dans un objectif cognitif. Les états, dont les zones économiques exclusives (ZEE) font partie de la zone de pêche de thon tropical, autorisent la pêche dans leur ZEE uniquement contre l'achat d'une licence annuelle. Ces états veulent donc contrôler si ces bateaux entrent et pêchent dans leurs ZEE. C'est pourquoi des balises émettrices de la position GPS ont été posées à bord des thoniers senneurs pour leur permettre de s'assurer que les bateaux ne pêchent pas dans certaines zones protégées.

Après cette première utilisation des données VMS, l'IRD a pu obtenir ces données pour en avoir un usage à but scientifique. En effet ces données sont disponibles pour tous les senneurs français depuis 2002. Ces informations sont acquises en continu dans le boîtier installé à bord des navires, puis envoyées à terre en temps quasi-réel (quelques heures de décalage) par satellite.

Elles permettent donc de reconstituer la trajectoire des navires à fine échelle (au moins une position toutes les heures) avec une bonne précision spatiale (erreur de positionnement des positions GPS faible, de quelques dizaines de mètres). Toutefois ces données ne fournissent aucune information

quant à l'activité du navire correspondant aux positions relevées ou l'environnement dans lequel évolue le navire.

Les données VMS disponibles concernent l'ensemble des thoniers senneurs français basés aux Seychelles (14 en 2006, 17 en 2007 et en 2008, du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre). Les caps et vitesses instantanés du navire sont enregistrés et transmis depuis 2006, mais ne sont pas complets (pour certains navires, aucune information ; pour d'autres, l'information est partielle).

Les données enregistrées dans le boîtier sont les positions des trois heures pleines (6h00, 7h00, 8h00, par exemple) précédentes au temps  $t$  (8h10). Puis au moment du passage d'un satellite Argos (NOAA-15, 16, 17, 18, 19, ou Metop A), la position au temps  $t$  est calculée et transmise, s'ajoutant aux positions des heures pleines précédentes. Dans la suite de la thèse, sont dénommées « données horaires », les positions calculées aux heures pleines (à 6h00, 7h00, 8h00), et, « données infra-horaires » ou « données intermédiaires » les positions supplémentaires lors des passages de satellites (à 8h10 par exemple).

En cas de défection du système ou de problème de transmission, il peut y avoir plusieurs heures sans donnée. Les fichiers de données VMS comprennent en général entre 8000 et 16000 positions par bateau et par année.

Le temps entre les acquisitions successives des données (positions) varie entre une minute et une heure, la plupart des données étant répertoriées au moins toutes les heures pleines (nombre élevé d'occurrences de pas de temps d'une heure entre positions successives) (fig. 37). Sur 18 bateaux, 16 enregistrent au moins 40% de données intermédiaires, en plus des données horaires.

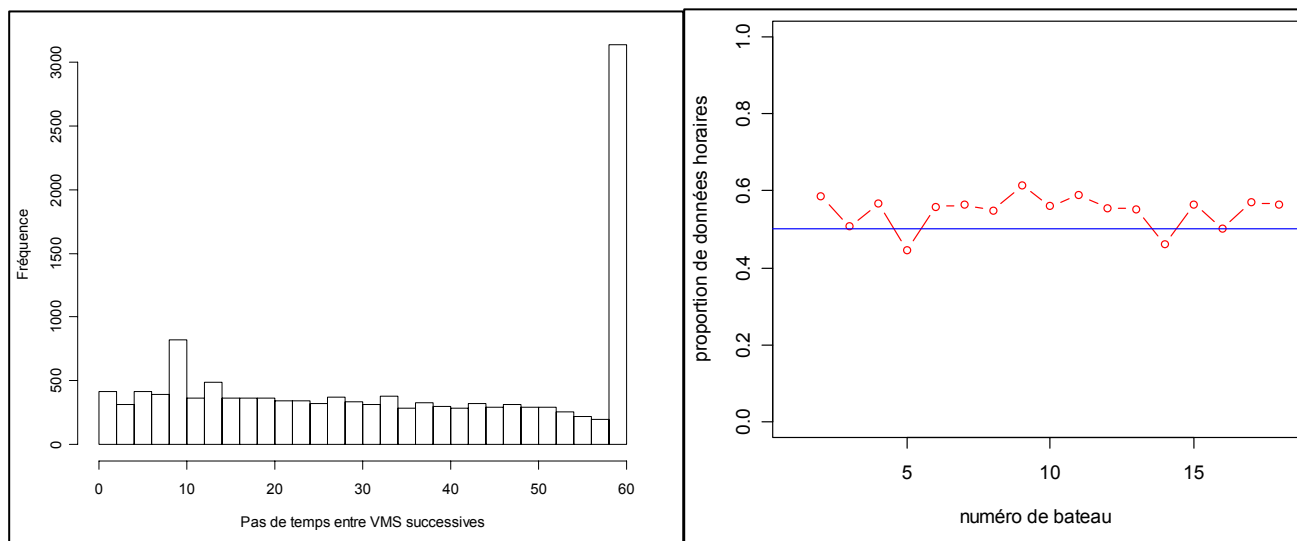


Fig. 37 : Histogramme de temps (en minutes) entre acquisitions successives des données VMS d'un navire pendant toute l'année 2006 (71 pas de temps sur 22 462 VMS sont supérieurs à 60 min et n'ont pas été représentés ici) (à g.). Proportion du nombre de données horaires par rapport au nombre de données VMS total, pour chacun des navires (à d.).

### b) Le pré-traitement des données

Outre certaines conversions et adaptations des données brutes, le premier travail sur ces données a consisté en la distinction des positions VMS où le navire est à quai (en escale), et celles où le navire

est en marée (sortie en mer) (fig. 38). Chacune des positions GPS a donc été comparée avec les coordonnées géographiques des ports où peuvent séjourner les navires (Victoria (Seychelles), Diego Suarez (Madagascar), Mombasa (Kenya), Dubaï (Emirats Arabes Unis), Port-Louis (Maurice)), tout en considérant un rayon (de 15 milles nautiques) autour du port où le bateau peut stationner (cas où il est toujours en escale sans être positionné exactement dans le port).

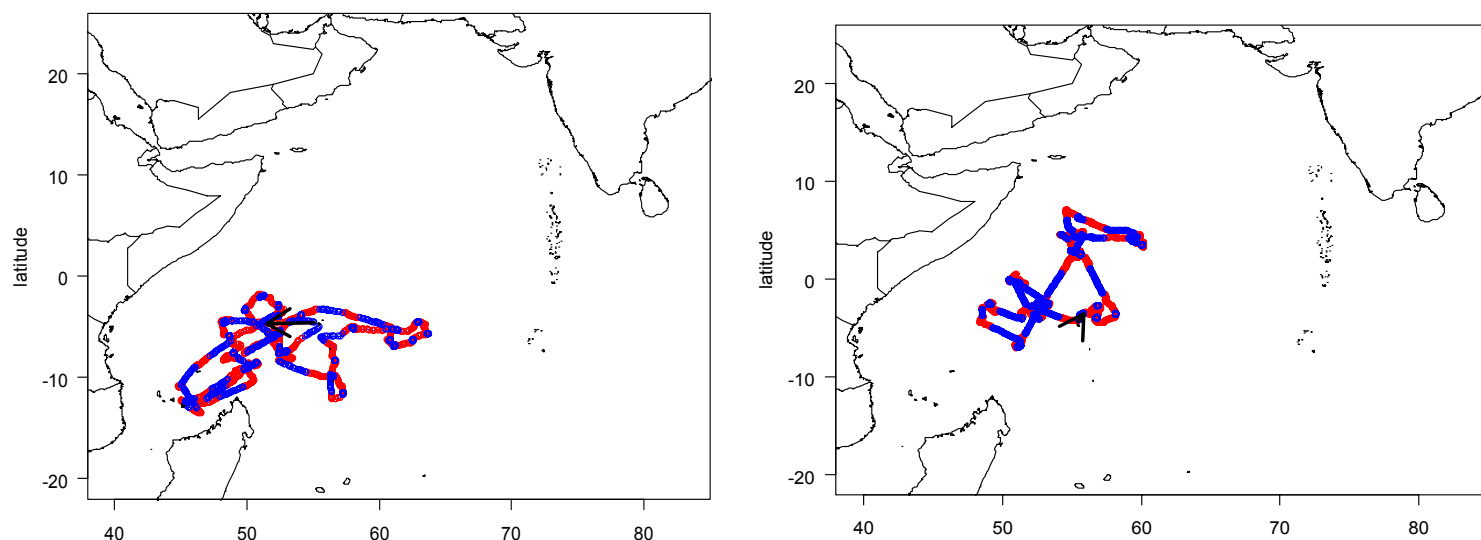


Fig.38 : Deux exemples de cartes de trajectoires de bateaux (trajets de jour, en rouge et de nuit, en bleu).

L'étape suivante a été de déterminer pour chacune des positions si elle correspond à une donnée de jour ou de nuit. La date (heure) de chaque VMS a donc été comparée avec les heures de lever et de coucher du soleil correspondantes à la zone où se trouve le navire.

Enfin, le calcul de la vitesse entre deux positions VMS a permis de constater l'aspect bimodal des vitesses de jour et de nuit (fig. 39). Les vitesses faibles (mode à 1-2 nœuds) peuvent correspondre à une dérive du navire de nuit ou à une calée de jour, alors que les vitesses fortes (mode de 12 nœuds) font référence à des trajets de route vers une zone de pêche ou à des trajets de recherche. Les angles de changement de cap ont un mode très marqué en 0, et comportent des occurrences dans chacune des classes d'angles.

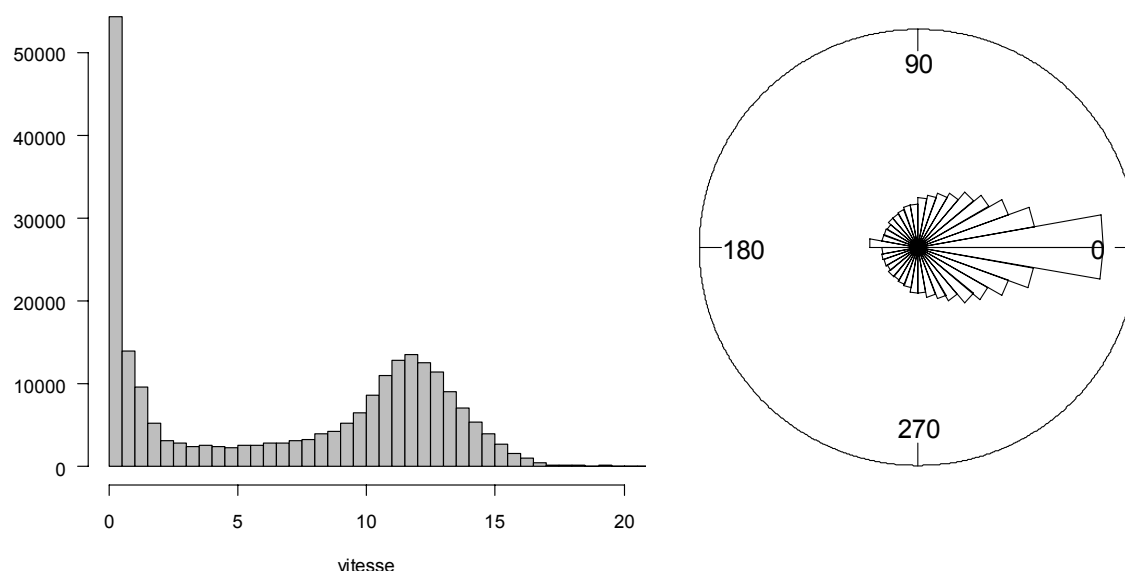


Fig. 39 : Histogrammes des vitesses et des angles de changement de cap (de jour) sur toute la flottille.

L'objectif final de l'analyse des données VMS est de déterminer à partir de ces seules données, l'activité du navire, c'est-à-dire pêche, arrêts, recherche ou route.

### c) Analyse exploratoire des données

#### Seuillage sur les vitesses : détection des calées à partir des données VMS

Appliqué aux données VMS, un premier algorithme permet de détecter les calées selon les vitesses entre deux positions VMS. Pour chaque position VMS, on considère l'algorithme suivant :

- si le navire est en marée,
- si la position correspond à une date de jour,
- et si les vitesses des deux pas précédents sont inférieures à 1.3 nœuds (seuil défini par tâtonnement),

La position VMS est alors considérée comme correspondant à une calée.

Un second algorithme a pour objectif la validation de la détection des calées en confrontant, pour les bateaux disposant de l'information, les estimations réalisées aux données d'observateurs (les marées observées en 2006).

On définit :

- la distance entre la position notée « observateur » et celle relevée par la donnée VMS est notée « Distance (OBS-VMS) »,
- l'heure de la calée détectée par les VMS est notée « Heure calée (VMS) »,
- l'heure de la calée notée par l'observateur est notée « Heure calée (OBS) »,
- la durée d'une calée nulle est de 1h30.

Pour chaque calée notée par un observateur, la validation se déroule de la manière suivante. Les conditions sont :

- la calée a été détectée dans les données VMS, grâce au premier algorithme,
- la distance (OBS-VMS) est inférieure à 3 milles nautiques, soit environ 0.05°,

- l'heure calée (VMS) est ultérieure à l'heure calée (OBS),
- la différence entre l'heure calée (VMS) et l'heure calée (OBS) est inférieure à 1h30.

Si toutes ces conditions sont réunies, alors la détection est considérée comme valide.

Les résultats de taux de détection des calées dans les données VMS sont compris entre 60 et 83% pour quatre cas, et entre 0% et 30% pour trois autres cas (table 5).

Table 5 : Taux de détection des calées

Navire	Observateur	Taux de détection des calées
Navire 1	Obs 1	63 %
Navire 1	Obs 1	80 %
Navire 2	Obs 2	74 %
Navire 3	Obs 3	0 %
Navire 4	Obs 4	83 %
Navire 4	Obs 4	30 %
Navire 3	Obs 6	7 %

Pour quatre marées (marées 1 et 2 de l'observateur 1, marée de l'observateur 2, et marée 1 de l'observateur 4), l'algorithme donne des taux de détection autour de 75%, mais il reste à être affiné, en incluant les vitesses instantanées dans le premier algorithme (table 5). Pour les autres marées, certains problèmes apparaissent : lorsque la fréquence d'acquisition des VMS est trop faible et trop irrégulière, la détection est plus difficile. C'est le cas pour le navire n°3, dont la fréquence des données est supérieure à une heure pour 30% des données VMS, ce qui explique les taux de détection faibles pour ce bateau (0% et 7%). Cette faible détection est aussi due au mauvais temps pendant ces marées, qui a engendré beaucoup plus de calées nulles que d'ordinaire, les calées nulles étant plus difficiles à détecter à cause de durée courte (c'est le cas pour la deuxième marée de l'observateur 4 et pour la marée de l'observateur 6).

C'est donc la combinaison d'un nombre élevé de calées nulles et une faible fréquence d'acquisition des VMS qui sont les causes des difficultés de détection des calées sur certaines marées. Un simple seuillage sur les vitesses n'apporte pas un taux de détection suffisamment élevé (le maximum étant 80% de détection).

### Indice de rectitude, variance d'angles

Outre les activités pêche ou non pêche, les retours d'expérience des observateurs embarqués mettent en évidence deux activités incluses dans l'activité « non pêche ». En effet, l'activité de recherche peut se diviser en deux activités qui sont liées à la zone dans laquelle se trouve le navire : dans une zone de bancs, la recherche y sera « active » grâce à l'observation de nombreuses apparences, alors que dans une zone entre deux zones de bancs, la recherche (« recherche-route ») sera caractérisée par l'absence d'apparences où la recherche est infructueuse.

L'activité « recherche dans une zone de bancs » (tracking en anglais) sera définie par une trajectoire sinueuse, c'est-à-dire des distributions de vitesses et d'angles de changement de cap uniformes. L'activité « recherche-route » (cruising en anglais) sera caractérisée par une trajectoire rectiligne, où la vitesse sera élevée et le cap changera peu. Pendant les phases de recherche-route, il y aura peu d'événements de pêche, car le navire se trouve dans une zone sans bancs de thon.

Dans le but de discriminer les deux types d'activité de recherche (recherche active et recherche-route), on calcule deux indices basés sur les vitesses et les angles de changement de cap issus des trajectoires VMS : l'indice de rectitude et la variance d'angles.

L'**indice de rectitude** est un ratio de distances : la distance à vol d'oiseau entre la 1<sup>ère</sup> position de la journée et la dernière position de la journée, et la distance parcourue au cours de la journée (somme des distances entre les positions successives) (Benhamou, 2004).

$$\text{Indice de rectitude : ratio} = \frac{\text{Distance à vol d'oiseau}}{\text{Distance parcourue}} = \frac{\text{Dist}(x_i, x_{i+12})}{\sum_{i=1}^{11} \text{dist}(x_i, x_{i+1})} \quad \text{pour } x_i, \text{ la position à l'heure } i$$

Lorsque cet indice est proche de 1, la trajectoire est rectiligne, alors que quand l'indice est proche de 0, la trajectoire est sinueuse.

La **variance des angles** de changement de cap est calculée de la manière suivante (Jammalamadaka and SenGupta, 2001) :

$$\text{Variance}_{\text{angles}} = 1 - \frac{1}{n} \sqrt{(\sum \cos(\theta))^2 + (\sum \sin(\theta))^2} \quad \text{pour } n \text{ angles de changement de cap } \theta$$

Les variances proches de 0 indiquent une faible dispersion autour du mode 0°, par conséquent une trajectoire avec peu de changements de cap ; les variances d'angles proches de 1 correspondent à une dispersion importante des angles, c'est-à-dire à une trajectoire sinueuse.

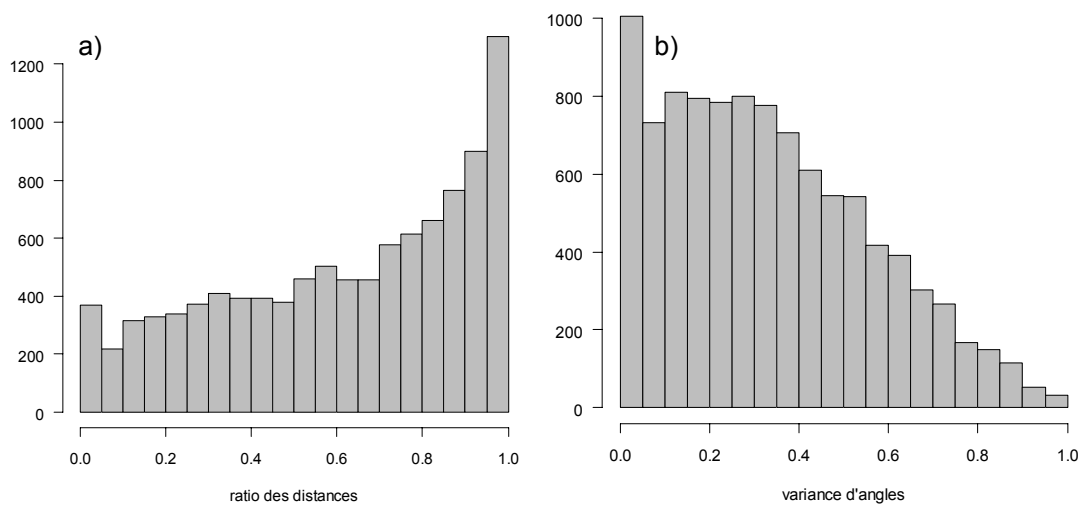


Fig. 40: Histogramme des indices de rectitude (ratios des distances) (a) et des variances d'angles (b) pour un navire.

Les indices ont été calculés pour chaque jour de chaque trajectoire. Les histogrammes des deux indices n'ont pas montré des modes différents selon les deux activités de recherche que l'on cherche à discriminer (fig. 40). La distribution des ratios de distances est croissante de 0 à 1, avec des occurrences dans chaque classe de ratio de distances. Il y a davantage de jours avec un ratio de distances supérieur à 0.7, c'est-à-dire avec une trajectoire plutôt rectiligne. La distribution des variances d'angles est décroissante avec un plus grand nombre d'occurrences pour des variances proches de 0, que pour des variances proche de 1.



Les histogrammes de l'indice de rectitude et de la variance d'angles de changement de cap ne permettent pas de distinguer deux modes correspondant à deux activités de recherche (recherche et route-recherche).

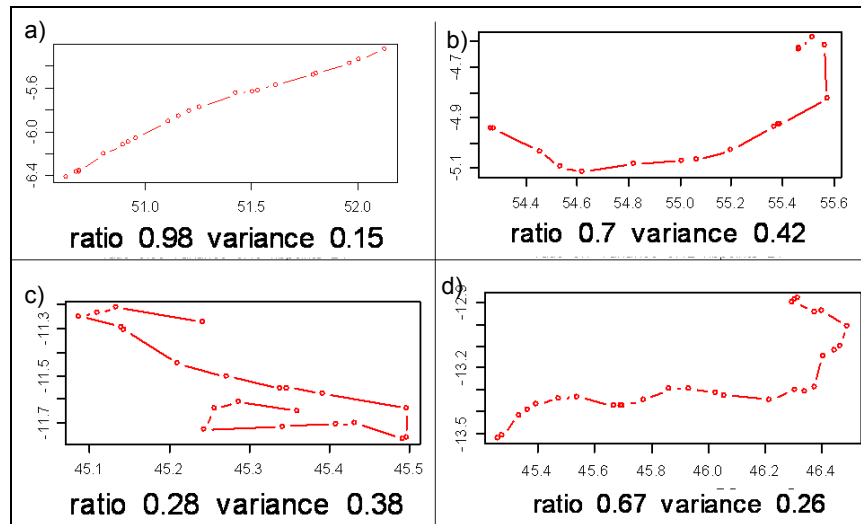


Fig. 41 : Exemples de calcul d'indice de rectitude (ratio de distances) et de variance d'angles.

En analysant les trajectoires de 4 jours (fig. 41), les indices de rectitude semblent correspondre à la sinuosité que l'on cherche à identifier : le ratio de distances est élevé pour l'exemple a), modéré pour les exemples b) et d), et plus faible pour l'exemple c). En revanche, la variance d'angles semble moins représenter la sinuosité, puisque pour la variance de la trajectoire b) est plus importante que la variance de la trajectoire c) pourtant plus sinueuse.

L'indice de rectitude et la variance d'angles sont donc utiles lors de l'exploration de données de trajectoires, mais ne permettent pas de discriminer les deux activités de recherche distinctes.

### Caractère markovien des vitesses

Le caractère markovien des vitesses a été testé en représentant les nuages de points entre les vitesses consécutives et les vitesses entre des pas de temps plus espacés (fig. 42).

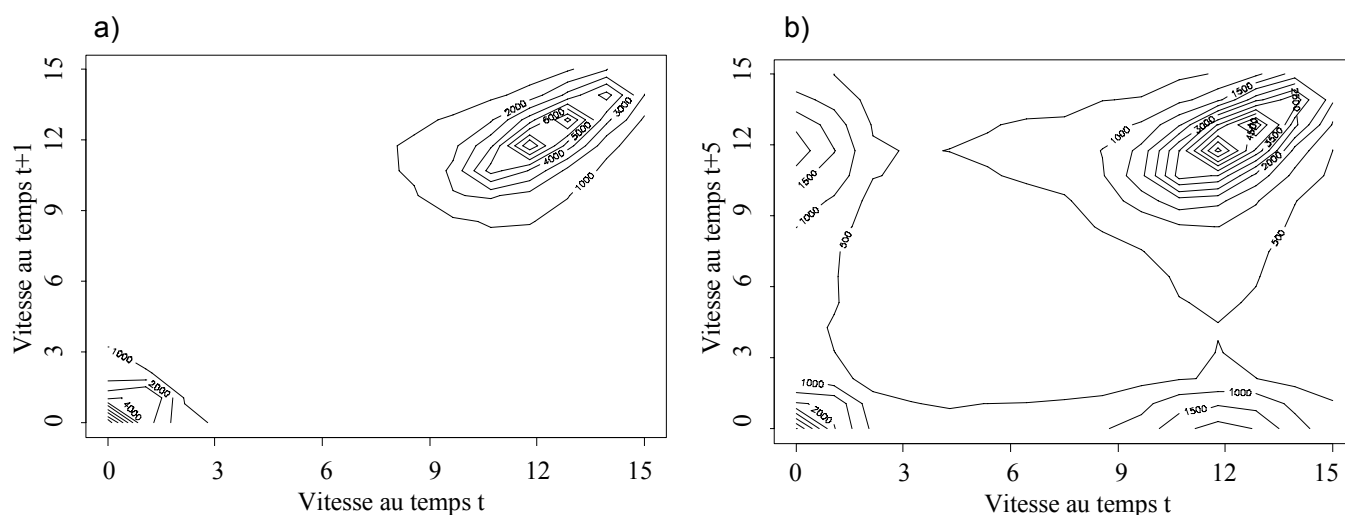


Fig. 42 : Courbes de densité des nuages de points entre les variables « vitesse au temps t » et « vitesse au temps t+1 » (a), et les variables « vitesse au temps t » et « vitesse au temps t+5 » (b).

Les vitesses au temps t sont très corrélées ( $\rho(V_t, V_{t+1}) = 0.58$ ,  $P < 0.001$ ) avec les vitesses au temps t+1 : la probabilité de rester dans la même classe de vitesses est élevée. Dès que l'on considère des pas de temps plus éloignés, la corrélation diminue, jusqu'à atteindre la distribution aléatoire.

La corrélation partielle qui quantifie la corrélation entre les vitesses au temps t et au temps t+2, une fois que la corrélation intermédiaire (au temps t+1) ait été ôtée, est beaucoup plus faible ( $\rho(V_t, V_{t+2} | V_{t+1}) = 0.06$ ). Ceci indique donc que la vitesse au temps t dépend fortement de la vitesse précédente et devient indépendante de la vitesse au temps t+2. Le caractère markovien des vitesses issues des trajectoires VMS est ainsi d'ordre 1.

#### Echantillonnage de la flottille de thoniers senneurs français

La stratégie d'échantillonnage de l'Océan Indien varie selon la saison. Les données VMS étant collectées à fine échelle, il devient possible de cartographier de manière précise et exhaustive les zones traversées par la flottille de thoniers senneurs, chaque mois des années 2006 et 2007.

La précision du calcul de la position GPS transmise par le boîtier VMS est de l'ordre de la dizaine à la centaine de mètres. De plus, le rayon d'observation aux jumelles d'un senneur est de l'ordre de 12 km de part et d'autre de la route du navire. Pour représenter la zone échantillonnée, il est donc pertinent de cartographier le nombre d'heures passées dans les cellules de  $0.25^\circ$  par  $0.25^\circ$  par les senneurs, pour chaque mois de l'année (fig. 43). L'échelle  $0.25^\circ$  par  $0.25^\circ$  correspond à des cellules de 30 km de côté, qui sont donc observées de manière exhaustive.

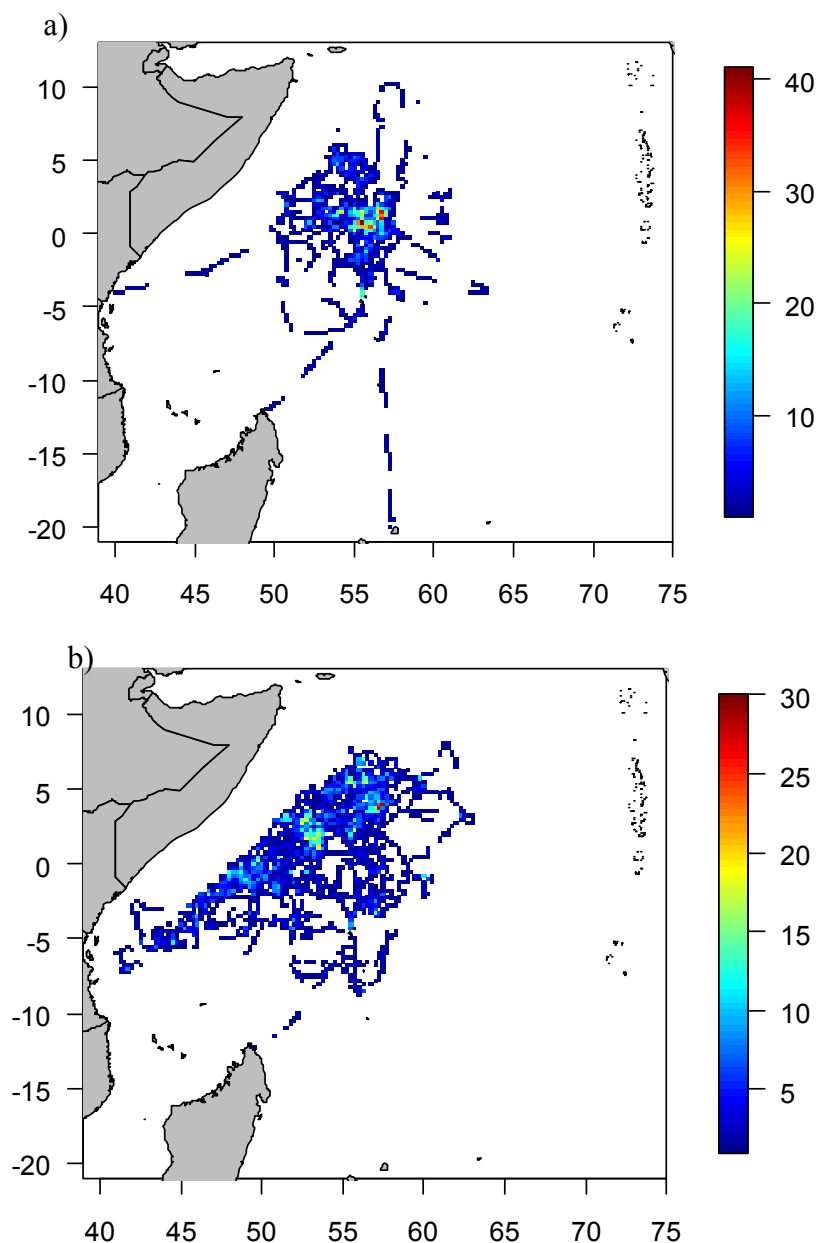


Fig. 43 : Echantillonnage de la flottille : cartographie du nombre d'heures passées dans chaque cellule 0.25° par 0.25°, pour les mois d'octobre 2006 (a) et d'août 2007 (b).

L'échantillonnage est assez inégalement réparti : beaucoup de cellules sont visitées très peu de temps (moins de 5h sur un mois considéré) et un petit nombre de cellules sont visitées pendant un grand nombre d'heures (supérieur à 20h dans le mois). L'échantillonnage dans la zone Somalie est limité par le risque de piraterie et les recommandations internationales sur la distance à la côte à respecter (de 200 m.n. à 500 m.n. aujourd'hui).

### Conclusion du chapitre

Le chapitre 2 avait pour objectif d'explorer les jeux de données disponibles pour répondre à la problématique de la thèse. Il apparaît que les trajectoires VMS peuvent être intéressantes pour un calcul fin de l'effort de pêche, grâce à la leur précision spatiale et temporelle par rapport aux livres de

bord. Des calculs simples appliqués aux trajectoires VMS, comme le seuillage sur les vitesses, ou des indices de sinuosité ne sont pas suffisants pour distinguer les activités de pêche ou de recherche sur les points successifs des trajectoires. Une fréquence d'acquisition plus fine (toutes les 15 minutes par exemple) permettrait sans doute que ces calculs sur les vitesses, les distances ou les angles de changement de cap deviennent informatifs sur l'activité du navire.

Les informations fines quantitatives et qualitatives notées par les observateurs, ainsi que l'analyse préliminaire des données VMS nous permettent de dresser un bilan des résultats qui pourront servir à la construction d'un modèle appliqué aux VMS pour identifier les activités du navire le long de sa trajectoire :

- Une calée a une durée minimum incompressible de 1h15 (ou 1h30 selon les bateaux)
- Pendant la calée d'une durée minimale d'1h15, le navire est immobile.
- La relation entre la durée d'une calée et le tonnage capturé n'est pas significative.
- Il n'existe pas de différence de comportement du navire de pêche entre le mouvement vers un banc libre et le mouvement vers un DCP trouvé (par hasard). Seuls peuvent être distingués les comportements vers un DCP propre et un banc libre ou DCP trouvé.
- Les observateurs ont des difficultés à noter si le DCP pêché est un DCP propre ou un DCP trouvé.
- Les VMS présentent des pas de temps entre acquisitions successives d'une durée minimale de 1h.
- Avec un simple seuillage sur les vitesses, la détection des calées sur une trajectoire VMS est réalisée sur seulement 75% des calées.
- Le calcul d'indice de rectitude ou de variance des angles de changement de cap ne permet pas de discriminer différentes activités de recherche sur les trajectoires VMS.
- Les vitesses entre points successifs extraites des VMS comportent un aspect markovien d'ordre 1.
- L'échantillonnage de l'Ouest de l'Océan Indien par les thoniers senneurs évolue d'un mois à l'autre au cours de l'année, il sera nécessaire de cerner les zones de pêche dans le cas d'une interpolation spatiale. Ces zones seront définies à partir des cartes d'échantillonnage de la flottille (fig. 43).

Pour toutes ces raisons, il est apparu intéressant de construire un modèle markovien à espaces d'états cachés basés sur les distributions de vitesses et d'angles de changement de cap issues des trajectoires VMS.



## ***CHAPITRE 3***

**Application et validation, par les données  
Observateurs, d'un modèle bayésien à états  
markoviens cachés aux trajectoires de  
navires de pêche (VMS)**

Le présent chapitre a pour objectif d'exposer la méthodologie appliquée aux données de trajectoires de thoniers senneurs. Il est rédigé sous forme d'un papier scientifique, qui a été soumis à la revue Ecological Modelling en novembre 2009.

### **RESUME du chapitre 3**

L'un des objectifs de la thèse est d'attribuer à chaque segment de trajectoire donné par les positions VMS, l'activité de pêche du navire. Il a donc d'abord été essentiel de définir quelles activités de pêche étaient pertinentes pour caractériser les stratégies de pêche des thoniers senneurs tropicaux français, du point de vue halieutique et du point de vue spatial. Le choix a été guidé par les caractéristiques de déplacement spatial induit par chaque activité, ainsi que par le rôle de chaque activité dans l'effort de pêche exercé par les navires.

Dans la littérature, différentes activités de pêche ont été identifiées telles que « traversée » (c'est-à-dire route sans recherche), « recherche », « décision de poursuite d'un banc », « décision de pêcher ou non » définies par Gaertner et al. (1999). Ces activités correspondent à des décisions de tactiques par le patron de pêche bien qu'elles n'aient pas toutes une correspondance avec le comportement spatial des navires.

Nous avons choisi les 4 activités de jour suivantes :

1. Pêche (« fishing »)
2. Arrêt (près d'un DCP ou d'un banc) (« stop »)
3. Recherche (« tracking »)
4. Route-recherche (« cruising »)

Dans le contexte de la pêche thonière à la senne, comme il a été expliqué dans le chapitre 2, une fois l'encerclement du banc de thon effectué, le navire est quasiment immobile pendant le coup de senne (mise à part la dérive due au courant). Les arrêts en mer des senneurs sont courants, souvent dus à :

- l'observation d'un banc pour juger de sa taille et du potentiel de la capture,
- des manœuvres sur les DCP (Dispositifs de Concentration de Poisson – FAD Fishing Aggregating Devices) pour la pose ou le retrait de balises émettrices,
- des avaries éventuelles.

Dans le cas de la pêche à la senne, la pêche et l'arrêt correspondent au même comportement spatial, qui est l'immobilité.

La recherche correspond à des phases de prospection des pêcheurs où de nombreuses détections d'apparences (banc de thon en surface, oiseaux, épaves dérivantes) ont lieu : la trajectoire qui en résulte est sinueuse, et même si la vitesse réelle du navire reste élevée, la vitesse apparente (entre deux positions horaires) peut être un peu inférieure à la vitesse optimale du navire. A contrario l'activité de route-recherche correspond à des phases où peu ou pas d'apparences sont détectées par les pêcheurs, bien que la veille aux jumelles et sur les radars à oiseaux soit maintenue : la trajectoire qui en résulte est rectiligne et la vitesse réelle et apparente est optimale (vitesse élevée à laquelle le navire optimise sa consommation de carburant), bien que le navire soit toujours en recherche.

Du point de vue du comportement dans l'espace, les activités 1 et 2 ont les mêmes caractéristiques de trajectoires (vitesse et cap). On définit donc les états à estimer par le modèle bayésien à partir des trajectoires :

1. Arrêt ou pêche
2. Recherche

### 3. Route-recherche

Les vitesses et angles de changement de cap ont été extraits des positions horaires successives et sont les données d'entrée du modèle. Ce sont donc par les lois de distribution des vitesses et angles qu'un état sera attribué à chaque segment de trajectoire. Le modèle est appliqué au cours de deux phases : une phase d'apprentissage sur une marée avec un Observateur embarqué, puis une phase de prédiction de l'ensemble des états des VMS. Le modèle à espace d'états markoviens, dans un cadre bayésien est mis en place pour établir les paramètres des lois des vitesses et angles de chaque état dans la 1<sup>ère</sup> phase, puis, dans la 2<sup>ème</sup> phase pour attribuer les états en fonction des vitesses et angles et des lois établies.

L'aspect markovien des états n'a pas pu être testé directement à cause de l'absence de données « activité » correspondant précisément aux états, en revanche, le caractère markovien des vitesses a été vérifié sur l'ensemble des données VMS et il apparaît que la corrélation simple (entre vitesses au temps  $t$  et vitesses au temps  $t+1$ ) est de l'ordre de 0.58, alors que la corrélation partielle entre les vitesses au temps  $t$  et  $t+2$  est de l'ordre de 0.06.

Le modèle est implémenté grâce aux algorithmes MCMC (chaînes de Markov par Monte-Carlo) qui ont permis aux outils bayésiens de devenir opérationnels. L'application de l'algorithme de Gibbs est réalisée grâce au logiciel OpenBUGS sur le logiciel R, par l'intermédiaire du package BRugs (Spiegelhalter 2007). L'approche bayésienne permet la prise en compte des distributions a priori des paramètres (priors), et la quantification de l'incertitude autour de l'estimation. Les distributions a posteriori des variables sont obtenues, le choix s'est ensuite porté sur la moyenne a posteriori par rapport au maximum a posteriori, comme sortie du modèle.

**La méthodologie de travail se résume donc en quatre phases :**

**I. Estimation des paramètres des lois des vitesses et caps**

**II. Estimation des états (1, 2, 3)**

**III. Estimation des actions de pêche parmi les arrêts : estimation des activités (1, 2, 3, 4)**

**IV. Validation des actions de pêche estimées avec les données Observateurs**

La 4<sup>ème</sup> phase, la validation des actions de pêche estimées, avec les données Observateurs a nécessité la prise en compte de la différence de format des données. En effet, les données VMS sont des données de type « segment » (ou « step » en anglais) décrit par Turchin (1998), alors que les données Observateurs sont des données de type « mouvement » (« move »). Les segments correspondent aux lignes droites entre les positions d'un individu relevées à pas de temps fixe (toutes les heures dans le cas des VMS). La longueur des segments peut indiquer la vitesse entre les deux points, si l'individu a conservé la même direction entre les deux points. Un mouvement est caractérisé par la même vitesse et le même cap entre le point de départ et le point d'arrivée. En revanche le temps écoulé pendant les mouvements successifs peut varier. C'est le cas des données collectées par les Observateurs, qui ont pour consigne de ne noter les positions du navire que lorsqu'il y a changement de vitesse ou de cap.

Les données utilisées sont ainsi :

(1) les VMS (sur la totalité de la flottille) qui sont des positions de jour à pas de temps régulier horaire. Les vitesses et caps horaires en sont extraits.



- (2) les données Observateurs (sur 10% de la flottille) qui sont des positions de jour à pas de temps irrégulier. Les vitesses, caps, activité (pêche ou non pêche) sont notées mais nécessitent une régularisation au pas de temps horaire.
- (3) une marée Observateur avec les VMS correspondantes, qui permettra de calibrer le modèle.

Ce type de modèle à espaces d'états, bayésien et markovien a déjà été appliqué à des trajectoires d'élans du Canada (Moralès et al., 2004), et de phoques (Jonsen et al., 2005). Mais dans les deux cas, la validation des choix du modèle et des paramètres n'a pas été rendue possible à cause du manque de données disponibles. Dans notre cas, la validation a été effectuée grâce aux données collectées par les Observateurs embarqués à bord des senneurs.

Les résultats et la discussion de cette approche sont détaillés dans l'article soumis ci-dessous.

### Conclusion du chapitre

Ce travail représente une première application d'un tel modèle à des données de pêche. La mise en œuvre du modèle et de la procédure de sélection des coups de pêche a permis l'estimation des activités de pêche le long des trajectoires de navires. Les données d'entrée du modèle étant les vitesses et angles de changement de cap, sont des données de déplacement relatives (et non des données de positions dans l'espace), et ne sont pas conditionnées par la zone de l'Océan Indien où se trouve le navire. Le modèle se comporte de la même manière quelle que soient la zone et la saison de pêche.

De plus, la validation des choix du modèle a été rendue possible grâce à des données collectées par des observateurs embarqués (ce qu'il n'est pas possible de faire dans le cas de trajectoires d'animaux). Cette validation a permis l'identification d'erreur d'estimation (de l'activité « pêche ») sur 10% des segments horaires. La validation n'a porté que sur la distinction « pêche » ou « non pêche » et non sur l'ensemble des degrés d'activité à cause de la précision des données Observateurs. Un contrôle par tâtonnement des erreurs d'identification a mis en évidence que la plupart des erreurs consiste en l'ajout de segments en pêche avant et après les segments réellement en pêche (effet de dilatation, la durée des coups de pêche est ainsi sur-estimée).

La méthodologie peut être utilisée dans d'autres contextes où les trajectoires individuelles sont connues, et la validation dans le cas présent assure une certaine pertinence de ce type de modèle pour la détermination d'états à chaque pas d'une trajectoire. Les trajectoires des pêcheurs peuvent être considérées comme n'importe quelle autre trajectoire de prédateur supérieur : les paramètres du modèle seront donc relativement généralisables à d'autres prédateurs marins, ayant le même comportement de recherche de proies. L'application à des prédateurs terrestres est possible aussi, bien que le milieu terrestre soit moins continu que le milieu marin.

Les VMS offrent un échantillonnage fin d'une partie de l'océan : grâce à l'estimation des activités de pêche, cet échantillonnage devient informatif et permet la caractérisation du milieu traversé (en termes de présence ou absence de thon) par les individus « pêcheurs » à un moment donné.

**A pioneer validation of a state space model of vessel trajectories (VMS) with observers data**

E. Walker <sup>(1,2)</sup> and N. Bez <sup>(1)</sup>

Soumis à Ecological Modelling

<sup>(1)</sup> IRD (Institut de Recherche pour le Développement) Avenue Jean Monnet BP 171, 34203 Sète, France. Tel : (0033) 4 99 57 32 04. Fax : (0033) 4 99 57 32 95

Corresponding author: Emily.walker@ird.fr

<sup>(2)</sup> CLS, 8-10 rue Hermès, Parc technologique du Canal, 31520 Ramonville Saint-Agne, France

**ABSTRACT**

In the context of the expansion of animal tracking and bio-logging, state-space models have been developed with the objective to characterise animals' trajectories and to understand the factors controlling their behaviour. In the fisheries community, the electronic tagging of vessels commonly designated by Vessel Monitoring Systems (VMS) is developing and provides a new insight for the understanding, the analysis and the modelling of the trajectories of vessels and their prospecting behaviour. VMS data are thus a clue for the proper definition of fishing effort which remains a fundamental parameter of tuna stock assessments. In this context, we used the VMS (recording of hourly positions) of the French tropical tuna purse-seiners operating in the Indian Ocean to characterize three types of movement (states) on the VMS trajectories (stillness, tracking, and cruising). Based on empirical evidences, and on the regular frequency of VMS acquisition, this was achieved by the development of a Bayesian Hidden Markov model for the speeds and turning angles derived from the hourly steps of the trajectories. In a second phase, states were related to activities disentangling stillness into fishing or stop at sea. Finally the quality of the model performances were rigorously quantified thanks to observers' data. Confronting model prediction and true activities allowed estimating that 10 % of the hourly steps were mis-classified. The assumptions and model' choices are discussed, highlighting the fact that VMS data and observers' data having different time resolution, the effective use of validating data was troublesome. However, without validation, these analyses remain speculative. The validation part of this work represents an important step for the operational use of state-space models in ecology in the broad sense (predators' tracking data, e.g. birds or mammals trajectories).

**Key words:** state-space model, trajectory, Vessel Monitoring Systems (VMS), Markov, Bayes, validation, tropical tuna purse-seiners, observers' data.

### INTRODUCTION

State-space models are commonly used in ecology and associated fields to analyse tracking data (Royer et al., 2005; Gutenkunst et al., 2007), in mark-recapture framework (Ovaskainen 2004; Gimenez et al., 2007) or in the stock assessment context.

Apart from their primary role in control and surveillance, Vessel Monitoring System (VMS) data have recently started to be used in the perspective of management plans like for instance for UK trawlers (Witt and Godley, 2007), or to estimate trawling effort allocation (Mills et al., 2007) or re-allocation after opening a marine protected area (Rijnsdorp et al., 2001). VMS data have also been simulated by Deng et al. (2005) to determine the VMS acquisition frequency required to describe trawl tracks in the prawn fishery off New Zealand. The ecological potential of such source of information is increasingly acknowledged especially in the case of open ocean (and for highly migratory species), where no exhaustive scientific stock assessment survey can be undertaken. Moreover some recent demonstrations highlighted that for fishing boats, and more specifically, for Peruvian anchovy purse-seiners, trajectories are those of efficient predators when the prey they are fishing are heterogeneous in space (Bertrand et al., 2005). Such considerations opened the use of the characteristics of the trajectories of vessels as a proxy for the abundance of the species they are targeting as this has been done for other marine top predators (Grémillet et al., 2004; Sims et al., 2006; Witt and Godley, 2007; Robinson et al., 2007).

However, to do so, it is necessary to relate the fishing activities and more precisely, the local behaviour of vessel, to various levels of the prey's presence. Previous works on animals or fishers that ought to characterise trajectories as a whole (e.g. Levy flights by Mandelbrot (1977); Viswanathan et al., 1996; Bertrand et al., 2005; Bertrand et al., 2007) or those that focussed on the sole identification of fishing operations (e.g. neural networks, Bertrand et al., 2008) or areas of restricted search -ARS (Knoppien and Reddingius, 1985; Fauchald and Tveraa, 2003; Tremblay et al., 2007), did not aim to qualify all the segments of a trajectory, segment by segment. The idea here was to build a model that associates one particular activity to any single element of a VMS trajectory. We identified four main activities: fishing, stopping, tracking and cruising. Other activities are described in the tuna fisheries literature (Gaertner et al., 1999). Indeed, the main objective when estimating the activity of the vessel for each segment of the trajectory was to identify fishing sets and prospecting phases off which it was relevant to distinguish between cruising and tracking.

The state-space methodology has proven to be efficient to describe population dynamics (Ovaskainen and Hanski, 2001; Buckland et al., 2004; Thomas et al., 2005; Patterson et al., 2008), or to re-estimate the real trajectory of a tagged animal according to the associated state in a given landscape (Royer et al., 2005; Jonsen et al. 2005). This framework has also been applied to infer foraging and encamped phases in Canadian elks' movements (Morales et al., 2004). The primary objective of this work was thus to develop a state-space model to estimate the behavioural states of fishing vessels from their trajectories regularly sampled by VMS. Speeds and turning angles were extracted in sequences from vessels' trajectories, and were used to estimate fishing activity. Thanks to empirical evidences, we choose to model shifts between states by an order one Markovian process. This model was built in a Bayesian framework so that the inference of the model parameters was outputs of Monte Carlo Markov Chains (MCMC). To our knowledge no publication has yet been produced on the use of such model on VMS data even though this is an active field of research (Vermard et al., submitted; Y. Vermard, pers. comm., 2009). More importantly, none is validated by field observations. The secondary objective of this paper was thus to validate the estimations of such a Bayesian Hidden Markov model by real observations. Without such ad hoc validation, these studies remain speculative

and we believe that the present paper represents an important step for the operational use of VMS in fisheries ecology.

Thanks to a long and fruitful collaboration with the French tropical tuna purse-seiners association and the French governmental department of Fisheries, we had access to their VMS data though under some confidentiality conditions. Meanwhile, due to the European Data Collection Regulation (DCR), 10% of the trips get observers on board providing us with data to validate the model.

### MATERIAL

#### Data

Since 2000, the European Commission legislated that all European fishing vessel longer than 24 meters should be equipped with a Vessel Monitoring System (VMS) (and then all vessels longer than 15m, in 2005) (EC, 1997 and 2003). The data used for this study were collected from the French-flagged purse-seiners based in the Seychelles islands, fishing several tropical tuna species (*Thunnus albacares*, *Katsuwonus pelamis*, *Thunnus obesus*) in the Western Indian Ocean (15 vessels in 2006, 17 vessels in 2007). The GPS (Global Positioning System) positions of the vessels were registered every hour and transmitted on shore by satellite (Argos or Inmarsat). Being GPS positions, the data were accurate (error smaller than few tens of meters) and regularly recorded every hour. Speeds (in knot) and turning angles (in radian) between consecutive positions were readily calculated from VMS data. They correspond to apparent hourly speeds and angles and not to the integration of the real speeds and angles along the vessel track. To honour the fact that vessels are most of time either full speed (around 12 knots) or immobile, we divided all speeds by the maximum possible speed for each vessel (~12 knots) so that they ranged between 0 and 1. Given the shoaling behaviour of the tropical tuna and given the fact that fishermen base their decision to fish on visual detection of tuna schools, fishing activity occurs at day. Only the daytime parts of the trajectories were then used. Starting and ending time of the day were deduced from the date and the latitude and longitude of each GPS position through an ad hoc routine to automatically select the daylight VMS data.

The observers' program in the French purse-seiner fleet in the Indian Ocean is being undertaken in the framework of the European Data Collection Regulation (DCR - EC Reg. 1563/2000). This regulation specifies that 10% of the trips realised by each member country fleet have to get an observer on board. For the French fleet of tropical purse-seiners operating in the Indian Ocean, the program started in November 2005 and 16 trips over a total of 120 trips were available for the period 2006-2007. However, only 11 trips corresponded to vessels with a French flag reducing the number trips that were available for the analysis. Observers record the position of the vessel at least every hour, and at each change of speed or turning angle (course) of the vessel. They also record the beginning and ending time of each fishing operation. One of these trips considered as a standard one with regards to the number of days at sea, the number of fishing sets, and the ratio of sets on free swimming schools and log schools, was used for calibrating the parameters of the model.

#### States and activities

We distinguished the states of a vessel (movement states which refer to its trajectory) from its activity. Schematically, the primer concerns the vessel, while the later refers to the fishermen on board this vessel. For the tropical tuna purse-seiner studied here, four major activities were considered. A fishing operation (activity 1 = fishing) lasted generally more than one hour due to the time required to set the seine out and to get it back. Unsuccessful fishing sets (null sets) corresponded to stops of 1.65 hours on average ( $\sigma = 0.5$  hours; Fig. 1). When the school was effectively trapped (positive sets), the extra time required to brail fish on board was one hour per 100 tonnes on average. The average duration of a

positive fishing operation was then 2.23 hours ( $\sigma = 0.58$  hours; Fig. 1). The second type of activity (activity 2 = stop) corresponded to stops at sea. Stops were required either to maintain electronic equipments located on Fish Aggregating Devices (FADs) or to evaluate the effective presence of fishable schools. In this regards stops at sea contributed, even in a non trivial manner, to the fishing effort. Long stops were hardly ever due to technical break-downs and damages. As a matter of fact, when such problems occur, skippers try as much as possible to postpone the immobilization of the vessel until the night. It was thus hypothesised that daylight stops corresponded to real stops contributing to the fishing activity. In the case of purse-seiner, no movement of the vessels (state 1 = still) was thus associated to two different activities namely fishing or stop at sea (state 1 = activity 1 + activity 2). The third activity was defined as the active tracking of visual appearances of tuna at the surface (birds, “balbaya”, “sardara”, FAD). This activity was typically associated to tortuous trajectories which was associated to the second key possible movement state of the vessels (activity 3 = state 2 = tracking). The final activity considered was cruising. In the particular case of purse-seiners, fishermen systematically maintain radar and visual tuna school inspection during all daily cruising phases (even when going straightforward to a new fishing site). Cruising phases are thus clearly part of the fishing effort even if trajectories associated to them were linear (activity 4 = state 3 = cruising). We got then to handle three behavioural states and four fishing activities (Table 1). Only one activity corresponded to fishing, strictly speaking. This was also the only activity recorded by observers. The other three ones were, in more or less complex manners, connected to prospecting effort and were not recorded by observers. Calibration of the model parameters and validation of the model outputs were thus expressed in terms of “fishing” versus “non-fishing” activities (Table 1).

### Moves and steps

One usually distinguishes two different frameworks for analysing trajectories (Turchin, 1998, pp. 127-134). In the step by step approach, trajectories are regularly sampled at a resolution given by the size of the steps in time. The true track between two samples (recording positions) is not known and the distributions of apparent speeds and turning angles provided by the observations are different from the true ones and varies with the step value (the homogeneity of the time resolution for the steps is thus fundamental). Alternatively, one can define the parts of the trajectory with constant speed and direction (moves). Moves are defined by constant speed and direction between two breaking points. The tracks between two breaking points are known and linear (up to some unavoidable tolerances needed in practice).

VMS positions were recorded every hour without any missing position and belonged to the primary type of data (steps). They were available for all trips (exhaustiveness over the fleet). Observers' data, and in particular their disjunctive “fishing/non-fishing” information, belonged to the second one (moves). With the objective to use them to improve the inference of vessels' activity from VMS data (i.e. definition of informative priors, definition of an optimal threshold to discriminate fishing from stopping, evaluation of the quality of the estimations), each step of trips with an observer was assigned a fishing or a non-fishing activity (Fig. 2). Due to the different temporal supports of the step data (fixed and equal to one hour), and of the move data (variable), and given that fishing was the key targeted activity, each step in which fishing occurred at least thirty minutes was considered to be a fishing step. Given the histogram of the duration of the fishing sets (Fig. 1), a fishing operation covered between two and seven consecutive steps.

## METHOD

### Dominant state and activity

The objective was to infer the activity of the vessel within each step knowing the apparent speeds and turning angles per step and to deduce which parts of the whole trajectory corresponded to fishing operations. In essence, states and activities are instantaneous qualitative variables. Their definitions at the step support were based on the following considerations. First, vessels usually did not switch from one particular state to the others too often, so that most of the steps often coincided with one unique state (pure steps). Second, changes of activity (moves) did not coincide with VMS acquisition (steps) so that some steps were made of several activities. Third, in one hour periods of time, fishermen could not experience more than two different types of fishing dynamics so that steps were made of two different activities at most, of which one is necessarily dominant and considered as the activity for the step.

### Model

Vessels' activities were estimated in two phases. In the first phase, a model of order 1 Markovian hidden states was used. A Bayesian framework allowed getting posterior distributions for the possible states of all steps. The second phase aimed at disentangling still state (state 1) between fishing and stops (activities 1 and 2). Finally, validation ought to quantify the ability to detect properly the presence/absence of fishing sets.

#### The state-space model

The unknown states of the vessels were represented by an hidden (latent) random multinomial variable denoted  $I_t \in \{1, 2, 3\}$ , for each step  $t$ . Observations ( $y_t$ ) corresponded to pairs of apparent relative speeds ( $s_t$ ) and turning angles ( $\phi_t$ ) of each step, and were considered as outcomes of the random variables  $S_t$  and  $\Phi_t$ . Relative speeds were considered to be *Beta* distributed with parameters depending on the state:

$$[S_t | I_t = i] = \text{Beta}(a_i, b_i), \text{ for } i \in \{1, 2, 3\} \quad (1)$$

with Beta probability density function defined by:

$$f_{\text{Beta}}(s_t, a_i, b_i) = \frac{1}{B(a_i, b_i)} \cdot s_t^{a_i-1} \cdot (1-s_t)^{b_i-1} \quad (2)$$

$$\text{where } a_i, b_i > 0 \text{ and } B(a_i, b_i) = \frac{\Gamma(a_i) \cdot \Gamma(b_i)}{\Gamma(a_i + b_i)}$$

Similarly, turning angles were modelled by a Wrapped Cauchy distribution (Bartumeus et al., 2008) with parameters depending on the state:

$$[\Phi_t | I_t = i] = \text{WC}(\mu_i, \rho_i), \text{ for } i \in \{1, 2, 3\} \quad (3)$$

The Wrapped Cauchy distribution is a circular probability function that allows modelling angular variables. It belongs to the same family of laws than the Von Mises distribution or the Wrapped Normal distribution (Mardia and Jupp, 2000; Jammalamadaka and SenGupta, 2001). Its probability density function is:

$$f_{\text{WC}}(\phi_t, \mu_i, \rho_i) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1 - \rho_i^2}{1 + \rho_i^2 - 2\rho_i \cdot \cos(\phi_t - \mu_i)} \quad (4)$$

#### Markovian property

States were unknown, making hazardous any decision on their properties, and in particular on their temporal autocorrelation. However, speeds and turning angles being dependent on the states, their

statistical properties were used to infer whether the states could be modelled by a Markov process and, if yes, of which order. Coefficients of correlation between successive speeds were large ( $\rho(S_t, S_{t+1}) = 0.58$ ,  $P < 0.001$ ). The partial correlations, which quantify the remaining correlation between the speeds at step  $t$  and  $t+2$ , after the correlation with the intermediate speed is removed, were much lower ( $\rho(S_t, S_{t+2} | S_{t+1}) = 0.06$ ). This indicated that the speed at a given step  $t$  was largely dependent of the previous speed but rather independent from the speed two steps before. The distribution of the turning angles also showed a mode around 0 (Fig. 4) not consistent with a random orientation at each step (Bovet and Benhamou, 1988; Turchin, 1998). Based on these empirical evidences, a Markov property of order 1 was then chosen for the states.

The associated transition matrix was designed considering that vessels could not switch directly from still state to cruising state, and vice-versa (probabilities equal to 0):

$$M = \begin{bmatrix} p_1 & 1-p_1 & 0 \\ p_2 & 1-p_2-p_3 & p_3 \\ 0 & p_4 & 1-p_4 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{still} \\ \text{tracking} \\ \text{cruising} \end{matrix} \quad (5)$$

still      tracking      cruising

The model was thus based on six parameters for the Beta distributions of the speeds (three states times two parameters per state), six parameters for the Wrapped Cauchy distributions of the turning angles, and four parameters for the transition matrix. All these 16 parameters were denoted  $\theta = (a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \rho_1, \rho_2, \rho_3, p_1, p_2, p_3, p_4)$ .

### Bayesian inference of the states

#### Simplification of the general expression

In a Bayesian framework (e.g. Strenio et al., 1983; Clayton and Kaldor, 1987; Wikle, 2003; Gelman and al., 2004; Moralès et al., 2004), the (posterior) probability of the state values and of the parameters was proportional to the likelihood of the data times some prior distribution for the parameters

$$[I_{1:T}, \theta | y_{1:T}] \propto [y_{1:T} | I_{1:T}, \theta] \cdot [I_{1:T} | \theta] \cdot [\theta] \quad (6)$$

Given the assumptions above mentioned, the posterior distribution simplified itself into

$$[I_{1:T}, \theta | y_{1:T}] \propto \left( \prod_{t=1}^T [y_t | I_t, \theta] \right) \cdot \left( \prod_{t=2}^T [I_t | I_{t-1}, \theta] \right) \cdot [I_1] \cdot [\theta] \quad (7)$$

Assuming that the speeds and turning angles were (conditionally) independent, the likelihood function ultimately reduced to the following expressions:

$$\prod_{t=1}^T [y_t | I_t = i, \theta] = \prod_{t=1}^T [S_t, \Phi_t | I_t = i, \theta] = \prod_{t=1}^T f_{\text{Beta}}(s_t, a_i, b_i) \cdot f_{\text{WC}}(\phi_t, \mu_i, \rho_i) \quad \text{for } i \in \{1, 2, 3\} \quad (8)$$

#### Definition of informative priors

One of the eleven trips with observers on board, i.e. a set of data for which the states were known, has been sacrificed to derived posterior distributions for the parameters. These posterior distributions were further used to define informative priors for the rest of the procedure.

As observers only recorded fishing versus non-fishing activities, states were temporally grouped to define the following new Binomial variable:

$$I'_t = \begin{cases} 1 & \text{if } I_t = 1 \\ 0 & \text{if } I_t = 2 \text{ or } I_t = 3 \end{cases} \quad (9)$$

The posterior distribution for the parameters was thus:

$$\left[ \theta | I'_{1:T}, y_{1:T} \right] \propto \left[ y_{1:T} | I'_{1:T}, \theta \right] \cdot \left[ \theta | I'_{1:T} \right] \quad (10)$$

We set vague priors (uniform distributions) for all parameters and got posterior distributions that were (visually) Gaussian.

#### Prediction of states with informative priors

In order to get a workable model, we fixed informative priors above defined for the parameters of the probability density function of the speeds ( $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ ) and of the turning angles ( $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \rho_1, \rho_2, \rho_3$ ). To honour possible differences from one vessel to the other, we let non informative priors for the parameters of the transition matrix.

Posterior distributions for the states were obtained by MCMC simulations using the software OpenBUGS (Thomas et al., 2006) in the software R with the package BRugs. The convergence was tested by the Gelman-Rubin test (Gelman and Rubin, 1992; Brooks and Gelman, 1998) with three chains of 20 000 iterations each. The Gelman-Rubin statistic reached 1 after 2000 iterations. A burn-in period of 2000 iterations was thus used and each chain was run during 20 000 extra iterations to get posterior distributions.

The model was applied vessel by vessel allowing the parameters to differ from one vessel to the next. This was done so to honour the fact that different vessels have different fishing strategies, that is different manners to switch from one activity to another and different resilience to activities. These differences translated potentially into different transition matrices. It was however assumed that, for a given activity, the distributions of the speeds and turning angles were similar over the entire fleet.

#### MAP and mAP

For each step, we extracted both the maximum a posteriori (MAP) and the mean a posteriori (mAP). Being multinomial, only the MAP for the states got a straightforward meaning. However, the mAPs were linked to the MAPs in such a way that the states' estimates could be interpreted as two pairs of binomial variables (Fig. 5). This was of particular interest as this allowed using the mAPs as an indicator for the uncertainties around the estimate.

#### **From states to activities**

The aim of the last phase of the procedure was to automatically identify which of the still steps were stops at sea or fishing sets. Given the characteristics of the fishing operations and of the frequency of data acquisition (see above), fishing sets spread over at least 2 consecutive steps. We thus considered that steps that belonged to sequences of at least two steps with mAP smaller than 2, preceded and followed by steps with mAP equal to 2 or larger than 2, could potentially be fishing steps. Amongst these pre-selected steps, steps below a threshold, yet to be defined, were finally selected.

The threshold was defined by an iterative procedure seeking the minimum overall misdetection rate between estimates and truth (observers' data). It was implemented on the 10 remaining trips with observers on board.

#### **Validation**

The best validation being the confrontation to field data, we confronted the estimated activities to those declared by the observers.



However, given the characteristics of the data this was not trivial.

The very truth data were provided by observers on board 10% of the vessels. Their declarations were based on fishing events only (not on states nor activities) and did not conform in terms of time of acquisition to VMS acquisition. A first calibration-validation phase corresponded to the allocation of still states to “fishing” or “stop” activities (Fig. 3). The calibration corresponded to the best correspondence between model outputs and observers’ data at step level with regards to (dominant) fishing activity (Fig. 2). Given that one trip had been used to infer informative priors, it remained only ten trips with full information for this calibration-validation phase and we decided to use them all to estimate the optimal cut-off, i.e. value for which the error rate between estimated fishing and observed fishing was minimum.

This was preferred than splitting the ten trips with observers into a calibrating and validating data sub-sets as we would have been unable to interpret the unavoidable difference of the model performance in the two sub-sets and as we would have lost a large amount of data for each of the two phases (calibration and validation).

The code used for the analyses is attached in annex 1.

## RESULTS

### Speeds and turning angles per state

The mAP for the parameters allowed getting the distributions of speeds and turning angles for the three states (Fig. 6). For the “still” state, the distribution of speeds was characterised by a mode at zero, and the distribution of turning angles was uniform. These distributions corroborate the behaviour of the vessel during a stop near a free-swimming school or a school associated with a FAD, or during a fishing set (Fig. 6/a, Fig. 6/d).

On the opposite, speeds and turning angles during “cruising” had sharp modes around 12 knots and 0 radian (Fig. 6/c, Fig. 6/f). This was strongly consistent with the fact that when they were cruising, vessels went straight at full speed, in order to move to another area or to go to a FAD (equipped with a proper radio buoy) without changing their direction (and speed) until appearance of tuna school was sighted.

The “tracking” state depicted intermediate distributions however more influenced by the “cruising” state. The distribution of speeds was more tailed with a smooth mode around 10 knots and the turning angles kept a mode around 0 radian. During the active search of tuna schools in an area of tuna aggregation, the changes in course were highly frequent and the vessels were cruising at full speed. But with hourly data, the apparent mean speed is necessarily intermediate (10 knots) (Fig. 6b, Fig. 6e).

### Quality of the estimations

The use of observers’ data to tune the optimal threshold to discriminate between “fishing” and “stop at sea” led to a compromise between under-detections and over-detections of fishing steps. The overall error did not show a clear optimal between threshold values of 1.1 and 1.6 (Fig. 7). The lowest mean square error (10.2%) was obtained for a threshold of 1.3. Despite the fact that similar level of under-detections and over-detections were obtained for a smaller threshold (around 5% for 1.2) without modifying significantly the overall MSE, we stuck to 1.3 which was more conservative with regards to under-detections (we did not want to miss fishing steps as much as possible without spoiling the overall performance of the model). This misdetection level was computed at the step level and was not relevant with regards to the capacity of the procedure to properly identify fishing operations as a

whole. As a matter of fact, for say, a set lasting 2 hours and half (Fig. 2), the last step may be estimated to be “fishing” while this was not the case (in terms of dominant activity).

### **Fishing behaviour and effort**

For each vessel, we took the mean and standard deviation of the posterior distributions of the parameters of their respective transition matrix. Differences between vessels were small (Fig. 8). The three probabilities on the diagonal of the transition matrix which corresponded to the probability to stay in the same state when moving to the next step, were homogeneously large amongst the fleet. The probabilities for changing from one state to the other ( $p_2$ ,  $p_3$  and  $p_4$ ) were, on the contrary, homogeneously low over the fleet. There was a clear linear link between posterior means and standard deviations (Fig. 9) so that the coefficients of variation for the estimations of these three parameters were highly constant and low (10%).

The posterior means of the states were distributed over three clear modes around 1, 2 and 3 (Fig. 5). The frequencies of (the time spent in) each activity indicated that the fleet spent 78% of its time prospecting (i.e. daytime minus the fishing operations which represented though 22%). The prospecting phase broke down into 34% cruising, 61% tracking schools in areas of aggregations in sinuous trajectories, and 5% being immobile. The model outputs for one particular trip were geo-referenced (Fig. 10) so that the fishing effort could be analysed spatially.

## **DISCUSSION**

The Bayesian Hidden Markov model developed in the present study was quite similar to already published works (Morales et al., 2004; Jonsen et al., 2005; Vermard et al., in press). The model was indeed a mixture of the “triple switch” model (three states with switching probabilities between states) and of the “switch constrained” model developed by Morales et al. (2004). The main difference between our work and other analyses of animal trajectories (Morales et al., 2004; Jonsen et al., 2005) and of VMS trajectories (Mills et al., 2007; Witt and Godley, 2007) relied on the use of field data provided by observers on board 10% of the vessels. This allowed i) setting specific values for the probability density functions of the speeds, ii) setting informative priors for the parameters of the transition matrix, iii) choosing the threshold to disentangle fishing events from stops at sea and iv) qualifying the output by a rigorous validation phase. In a matter of fact, most analyses of trajectories, if validated, are validated by qualitative means. Amongst these qualitative criteria, one can mention the coherence of the distributions of speeds and turning angles by state (e.g. Morales et al., 2004; Vermard et al., in press), the sinuosity of tracks in ARS areas (e.g. Tremblay et al., 2007) or simply the fact that algorithms managed to provide outputs (Jonsen et al., 2005). The ARS areas estimated by an algorithm based on fractal dimension (Tremblay et al., 2009) were consistent with the tracking steps estimated by the actual model. However such algorithms are specifically dedicated to the detection of sinuous patterns and can identify neither fishing sets nor cruising path. The same type of approach was already applied to animals' trajectories (Morales et al., 2004; Jonsen et al., 2005, 2007; Bailey et al., 2008), although no validation were performed. Some works in theoretical ecology showed that the characteristics of predators' trajectories linked to their searching strategy can be modelled by a correlated random walk (CRW) (Bovet and Benhamou, 1988; Zollner and Lima, 1999). Given that fishers' behaviour is approaching top predators' behaviour (Bertrand et al., 2007), the assumptions and validation components of the present modelling may be adapted to others predators' trajectories.

The Markov property of state-space models is often postulated while in the present case we based this decision on empirical evidences. By the way, the model could have easily been adapted to semi-hourly

VMS data (not presented here), but would have required fundamental changes in the case of smaller time intervals between positions (10 minutes) as the Markov property of order one would have become largely insufficient or in the case of irregular acquisition of positions. Similarly, the conditional independence between speeds and turning angle was an acceptable assumption because we used apparent speeds and angles for 1 hour steps, and not instantaneous values. For high resolution data, it would have been irrelevant to imagine a vessel making a 180° turn while being full speed (negative correlation between instantaneous speed and angle in state “cruising”). However at the scale of one-hour steps, apparent speeds and angles can be considered as having no correlation (knowing the speed does not tell any thing on the turning angle provided that we know the state). The fact that both the probability density functions of the speeds and of the turning angles changed together with the state, is indeed a consequence of the conditional independence present in the model.

Observers' data allowed both choosing the structure of the model (e.g. Markov behaviour), setting informative priors for some parameters and quantifying the performance of the model. We assumed i) that fishermen's behaviours were different in terms of their resilience in a particular activity or their tendencies to move quickly from one activity to the other and ii) that the speed and turning angles were specific to an activity and not to a fishermen. We thus let the transition matrix to move from one vessel to the next (but the outputs indicated that little differences existed) and had distributions of speeds and turning angles common to all vessels. As far as priors are concerned, we distinguished between parameters that were assumed independent from the vessel and those possibly dependent. The first sub-set corresponded to the parameters of the speeds and turning angles probability density functions. The second corresponded to the transition matrix. The use of informative versus non informative priors was however tested and did not show any significant impact on the results. Still the use of informative priors allowed to speed up the convergence of the Monte Carlo Markov Chains, and to insure coherence in the sequence of activities with regards to postulated links between tuna presence and activity (not presented here).

Using observers' data got however a price. We had to make compromises when crossing observations and trajectories, specifically with regards to fishing operations. The main difficulty relied in the fact that moves data (observers) did not have the same time resolution than step data (VMS). We solved the problem by defining dominant activities which remain an operational solution as long as the frequency with which skippers move from one activity to another is not too high (high with respect to the frequency of VMS acquisition). Still there were many steps that corresponded to several activities. The question that arose was then to know if the mAP of state could be interpreted as estimation of the proportion of time spent by the vessel in different states. The mAP is clearly an empirical version of the expect value of the multinomial state random variable and is, in this regard, clearly defined. However its meaning in terms of proportion of states is unclear and non univocal. For instance, in theory, a mean of 2.5 can be either associated to equi-probable occurrence of two and three or, with three quarters of threes and one quarter of ones. The above question was indeed answered in two steps. First the relationship between MAP and mAP (Fig. 5) indicated that despite the fact that the state was in theory a multinomial variable, in practice, it could be reduced to sets of binomials for the interpretation. In such a case, the mAP became directly connected to the probabilities associated to the two competing states. It was then further assumed that the hesitation to elucidate a dominant state for the running step, and though the value of the mAP, was an estimation of the proportion of the time spent in each states. In other words, intermediate mAP values (between 1 and 2, and between 2 and 3) indicated cases where one part of the hourly step corresponded to one type of activity, and the second to an other one.

Because vessels were, up to a small drift, totally immobile during fishing operation, and because fishing sets lasted at least 1h15, a simple discrimination between the low hourly speeds and the high hourly speeds to detect fishing operations were used as a benchmark method (i.e. a level above which any more sophisticated method should not go). The optimal threshold we obtained provided 20% of misdetections. Surprisingly, this is of the same order of magnitude as an even more simple method where all steps were classified as non-fishing. The proportion of the fishing steps in the observers' dataset being 19%, a decision rule attributing systematically a non-fishing state to all steps would generate also 19% of misclassifications. The method presented in this paper provided twice better outputs than the benchmark models (10.2 % misclassified steps). By the way, 97% of the fishing sets declared by observers had been detected by the model. Some sequences (e.g. three fishing sets of two hours each separated by only a quarter of an hour) were viewed as only one long sequence of six fishing steps which explains possible small under-detection. The percentage of over detection (15%) appeared large. Two elements can be advocated here. First, compared to the performance of the model at step level, this percentage was computed over the number of fishing operations which was two orders of magnitude lower than the number of steps. Second, given that in this particular fishery, fishing is equivalent to stillness and that vessels have sometimes to stop, it is impossible to avoid interpreting stop sequences as fishing sequences.

The value of distinguishing four activities, and not only “fishing” or “not fishing”, is to identify the change points of strategy, that is the skipper's decision to search actively (rigorous prospecting) tuna in a small area, or to move to another area (Gaertner and Dreyfus-Leon, 2004). Furthermore the stop and tracking states are proxies for tuna's presence and will allow quantifying the fishing effort corresponding to the fishing sets in the same area and at the same period. The fishing effort will have to be calculated for each cell of space and for a defined temporal scale. As it has been studied by Piet and Quirijns (2009), the scale of effort calculation has to be chosen wisely according to the fishery. The searching behaviour being a proxy for tuna presence, maps of potential presence of tuna could well be derived from the model's results helping the delimitation, of tuna concentrations in time and space.

### ACKNOWLEDGEMENTS

The work was co-funded by the European project: “Catch, Effort and Discard Estimates in Real time” (CEDER, FP7-022615) and by CLS (Collecte Localisation Satellite in Toulouse, France, <http://www.cls.fr>). Thanks to cooperative skippers from ORTHONGEL, data from scientific observers were kindly provided by the French "Observatoire thonier tropical" ([www.ot.ird.fr](http://www.ot.ird.fr)) from IRD. VMS data were provided by the French Fisheries Department (Direction des Pêches Maritimes).

### BIBLIOGRAPHY

- Bailey, H., Shillinger, G., Palacios, D., Bograd, S., Spotila, J., Paladino, F., Block, B., 2008. Identifying and comparing phases of movement by leatherback turtles using state-space models. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 356, 128–135.
- Bartumeus, F., Catalan, J., Viswanathan, G.M., Raposo, E.P., da Luz, M.G.E., 2008. The influence of turning angles on the success of non-orientated animal searches. *J. Theor. Biol.* 252, 43–55.
- Bertrand, S., Burgos, J., Gerlotto, F., Atiquipa, J., 2005. Lévy trajectories of Peruvian purse-seiners as an indicator of the spatial distribution of anchovy (*Engraulis ringens*). *ICES J. Mar. Sci.* 62, 447–482.
- Bertrand, S., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Gerlotto, F., 2007. Scale-invariant movements of fishermen: the same foraging strategy as natural predators. *Ecol. Appl.* 17, 2, 331–337.
- Bertrand, S., Díaz, E., Lengaigne, M., 2008. Patterns in the spatial distribution of Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) revealed by spatially explicit fishing data. *Prog. Oceanogr.*, 79, 379–389.
- Bovet, P., Benhamou, S., 1988. Spatial analysis of animals' movements using a correlated random walk model. *J. Theor. Biol.* 131, 419–433.
- Brooks, S.P., Gelman, A., 1998. General methods for monitoring convergence of iterative simulations. *J. Comput. Graphi. Stat.*, 7, 434–455.
- Buckland, S.T., Newman, K.B., Thomas, L., Koesters, N.B., 2004. State-space models for the dynamics of wild animal populations. *Ecol. Model.* 171, 157–175.
- Clayton, D.G., Kaldor, J.M., 1987. Empirical Bayes Estimates of Age-Standardized Relative Risks for Use in Disease Mapping. *Biometrics*, 43, 671–681.
- Deng, R., Dichmont, C., Milton, D., Haywood, M., Vance, D., Hall, N., Die, D., 2005. Can vessel monitoring system data also be used to study trawling intensity and population depletion? The example of Australia's northern prawn fishery. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 62, 611–622.
- Fauchald, P., Tveraa, T., 2003. Using first-passage time in the analysis of area-restricted search and habitat selection. *Ecology* 84, 282–288.
- Gaertner D., Pagavino, M., Marcano, J., 1999. Influence of fishers' behaviour on the catchability of surface tuna schools in the Venezuelan purse-seiner fishery in the Caribbean Sea. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56, 394–406.
- Gaertner, D., Dreyfus-Leon, M., 2004. Analysis of non-linear relationships between catch per unit effort and abundance in a tuna purse seine fishery simulated with artificial neural networks. *ICES J. Mar. Sci.* 61, 812–820.

- Gelman, A., and Rubin, D.B., 1992. Inference from iterative simulation using multiple sequences. *Statistical Science* 7, 457-511.
- Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., Rubin, D.B., 2004. *Bayesian Data Analysis*. Chapman & Hall/CRC, Second Edition, 698 pp.
- Grémillet, D., Kuntz, G., Delbart, F., Mellet, M., Kato, A., Robin, J.P., Chaillon, P.E., Gendner, J.P., Lorentsen S.H., Le Maho, Y., 2004. Linking the foraging performance of a marine predator with local prey abundance. *Funct. Ecol.* 18, 793-801.
- Gimenez, O., Rossi, V., Choqueta, R., Dehais, C., Doris, B., Varella, H., Vila, J-P., Pradel, R., 2007. State-space modelling of data on marked individuals. *Ecol. Model.* 206, 431–438.
- Gutenkunst, R., Newlands, N., Lutcavage, M., Edelstein-Keshet, L., 2007. Inferring resource distributions from Atlantic bluefin tuna movements: An analysis based on net displacement and length of track. *J. Theor. Biol.* 245, 243–257.
- Jammalamadaka, S.R., SenGupta, A., 2001. *Topics in Circular Statistics*. World Scientific, River Edge, N.J.
- Jonsen, I.D., Flemming, J.M., Myers, R.A., 2005. Robust state-space modelling of animal movement data. *Ecology* 86, 2874–2880.
- Jonsen, I.D., Myers, R.A., James, M.C., 2007. Identifying leatherback turtle foraging behaviour from satellite telemetry using a switching state-space model. *Mar Ecol Prog Ser* 337, 255–264.
- Knoppien, P., Reddingius, J., 1985. Predators with two modes of searching: a mathematical model. *J. Theor. Biol.* 114, 273-301.
- Mandelbrot, B. B., 1977. *Fractals, Form, Chance and Dimension*. W. H. Freeman and Co., San Francisco, 365 pp.
- Mardia, K.V., Jupp, P., 2000. *Directional Statistics* (2nd edition), John Wiley and Sons Ltd.
- Mills, C.M., Townsend, S.E., Jennings, S., Eastwood, P., Houghton, C.A., 2007. Estimating high resolution trawl fishing effort from satellite-based vessel monitoring system data. *ICES J. Mar. Sci.* 64, 248–255.
- Morales, J.M., Haydon, D.T., Frair, J., Holsinger, K.E., Fryxell, J.M., 2004. Extracting more out of relocation data: building movement models as mixtures of random walks. *Ecology* 85, 2436–2445.
- Ovaskainen, O., Hanski, I., 2001. Spatially structured metapopulation models: global and local assessment of metapopulation capacity. *Theor. Popul. Biol.* 60, 281-304.
- Ovaskainen, O., 2004. Habitat-Specific Movement Parameters Estimated Using Mark-Recapture Data and a Diffusion Model. *Ecology*, 85(1), 242-257.

- Patterson, T.A., Thomas, L., Wilcox, C., Ovaskainen, O., Matthiopoulos, J., 2008. State-space models of individual animal movement. *Trends Ecol. Evol.*, 23, 2, 87-94.
- Piet, G.J., Quirijns, F.J., 2009. The importance of scale for fishing impact estimations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 66, 829–835.
- R Development Core Team, 2004. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 3-900051-00-3. <http://www.R-project.org>.
- Rijnsdorp, A.D., Piet, G.J., Poos, J.J., 2001. Effort allocation of the Dutch beam trawl fleet in response to a temporarily closed area in the North Sea. ICES, Copenhagen (Denmark). CM 2001/N:01.
- Robinson, P.W., Tremblay, Y., Crocker, D.E., Kappes, M.A., Kuhn, C.E., Shaffer, S.A., Simmons, S.E., Costa D.P., 2007. A comparison of indirect measures of feeding behaviour based on ARGOS tracking data. *Deep-Sea Res. Part II* 54: 356–368.
- Royer, F., Fromentin J.M., Gaspar P., 2005. A state-space model to derive bluefin tuna movement and habitat from archival tags. *Oikos* 109, 473–484.
- Sims, D.W., Witt, M.J., Richardson, A.J., Southall, E.J., & Metcalfe, J.D., 2006. Encounter success of free-ranging marine predator movements across a dynamic prey landscape. *Proc R Soc B.*, 273, 1195-1201.
- Strenio, J.F., Weisberg, H.I., Bryk, A.S., 1983. Empirical Bayes estimation of individual growth-curve parameters and their relationship to covariates. *Biometrics.* 39, 1, 71-86.
- Thomas, L., Buckland, S.T., Newman, K.B., Harwood, J., 2005. A unified framework for modelling wildlife population dynamics. *Aust. NZJ Stat.* 47(1), 19–34.
- Thomas, A., O Hara, B., Ligges, U., Sturtz, S., 2006. Making BUGS Open. *R News* 6: 12-17.
- Tremblay, Y., Roberts, A.J., Costa D.P., 2007. Fractal landscape method: an alternative approach to measuring area-restricted searching behavior. *J. Exp. Biol.* 210, 935–945.
- Tremblay, Y., Robinson, P.W., Costa, D.P., 2009. A parsimonious approach to modeling animal movement data. *Plos One*, 4, 3.
- Turchin, P., 1998. Quantitative analysis of movement. *Measuring and Modeling Population Redistribution in Animals and Plants*. Sinauer Associates, Inc. 396 pp.
- Vermard, Y., Rivot, E., Mahevas, S., Marchal, P., Gascuel, D., 2009. Identifying fishing trip behaviour and estimating effort from VMS data using Bayesian Hidden Markov Models, *Ecol. Model.*, submitted.
- Viswanathan, G.M., Afanasyev, V., Buldyrev, S.V., Murphy, E.J., Prince, P.A., Stanley, H. E., 1996. Lévy flight search patterns of Wandering Albatrosses. *Nature* 381:413.

Wikle, C.K., 2003. Hierarchical Bayesian models for predicting the spread of ecological processes. *Ecology* 84, 6, 1382-1394.

Witt, M.J., Godley, B.J., 2007. A Step Towards Seascape Scale Conservation: Using Vessel Monitoring Systems (VMS) to Map Fishing Activity. *PLoS ONE* 2, 10.

Zollner, P.A, Lima, S.L., 1999. Search Strategies for Landscape-Level Interpatch Movements. *Ecology*, 80(3), 1019-1030.



**TABLES**

Table 1

Definition of the dominant states and activities per step. Discrimination between effective fishing and various activities contributing to prospection.

Model (120 trips, 96 325 steps)		Observations (11 trips; 3 510 steps)
States	Activities	
Cruising	Cruising	Non Fishing (Prospecting activities; components of fishing effort)
Tracking	Tracking	
Still	Stop	
	Fishing	Fishing

### FIGURES

Fig. 1: Histograms of the duration (in hours) of fishing operations (fishing sets). Observers' data set (10% of the complete fleet). Hachured white: successful sets ( $m = 2.23$  h,  $\sigma = 0.58$  h). Grey: unsuccessful sets ( $m = 1.65$  h,  $\sigma = 0.50$  h).

Fig. 2: Rule for affecting "Fishing" / "Non Fishing" activities into regular steps. This was compulsory to confront model outputs (steps) to observations (sets). A step was said to be "Fishing" (reversely "Non Fishing") when at least 30 minutes of fishing occurred during the step (dominant activity).

Fig. 3: Flowchart of the complete methodological framework. The main phases are 1) the use of one of the eleven trips with full information for the elicitation of informative priors, 2) the use of the ten remaining trips to choose a threshold to disentangle still states into effective fishing operations and stops at sea and to quantify the error made at this stage, and the validation of fishing steps with the ten remaining trips, and 3) the use of all vessels' locations (Vessel Monitoring System data) to estimate vessels' dominant activities during each step.

Fig. 4: Histogram of turning angles (in radians) for all the trajectories (96 325 steps).

Fig. 5: Relationships between maxima a posteriori (MAP) and means a posteriori (mAP). For each of the 96 325 steps, the posterior multinomial distribution of the possible states allowed computing a MAP (the state getting the largest probabilities to occur) and a mAP (the arithmetic means of the posterior distributions). For each possible MAP value (x-axis), the boxes represent the 25% and 75% quartiles of the 96 325 associated mAP values, and the whiskers represent the extreme mAP values.

Fig. 6: Distributions of speeds (in knots, i.e. nautical miles per hour) (a, b, c) and turning angles (in radians) (d, e, f) for the three states.

Fig. 7: Determination of an optimal mAP threshold for affecting one of the two possible activities "stop" and "fishing" to steps estimated in "still" state. Errors are evaluated as the proportion of correctly classified steps with regards to "Fishing" / "Non Fishing" activities by confronting model outputs and observers' declarations (Table 1) using the ten available trips with both VMS and observers' data (3510 steps). The total proportions of misdetection (y-axis) are decomposed into over detection rates and under detection rates as a function of the threshold values (x-axis). The vertical line corresponds to the chosen threshold (1.3).

Fig. 8: Histograms of the 17 means of the posterior distributions of the parameters of the transition matrix of the 17 vessels available for this study. The overall mean is indicated and represented by a vertical line as well.

Fig. 9: Relationship between posterior means and standard deviation for the parameters of the transition matrix of the 17 vessels. Each point corresponds to the mean and standard deviation of the posterior distributions for one parameter of the transition matrix. Triangles:  $p_2$ ; Crosses:  $p_3$ ; Circles:  $p_4$  (see Equation 5).

Fig. 10: Outputs of the model (“fishing”, “stop”, “tracking”, and “cruising”) are represented geographically along the trajectory of a vessel (example of one randomly selected trip of 30 days). Night parts of the track are represented by thin continuous lines.

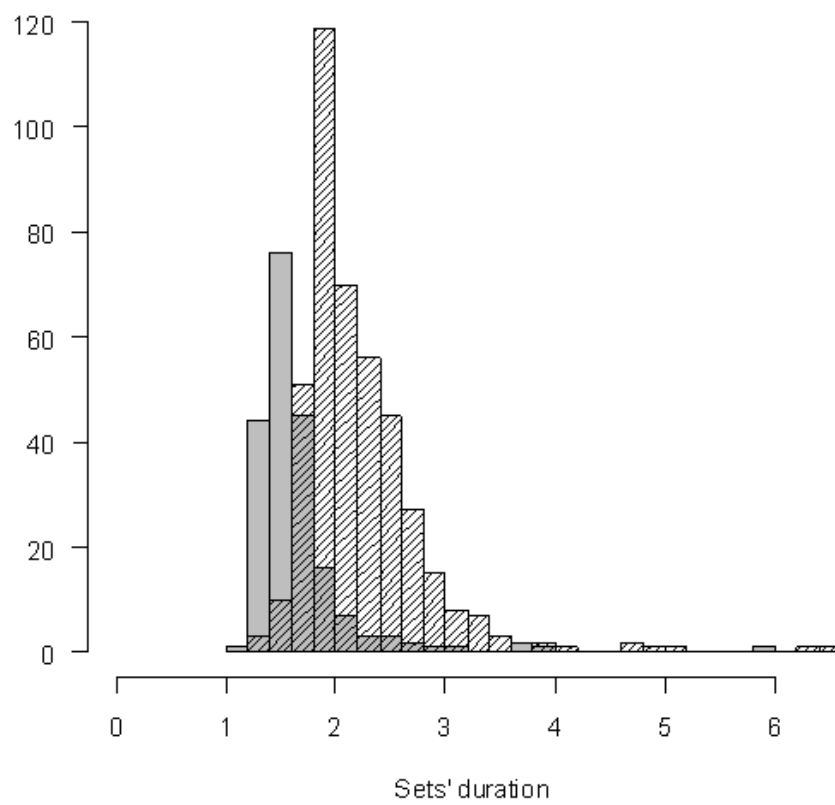


Figure 1

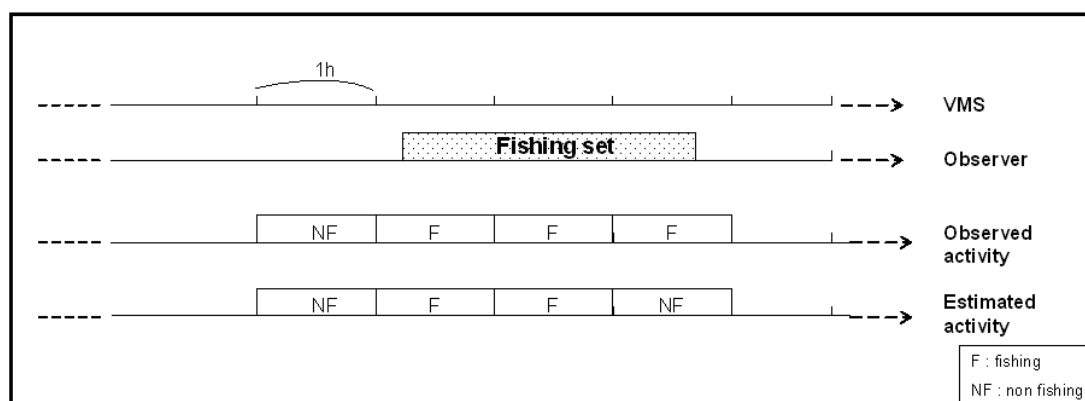


Figure 2

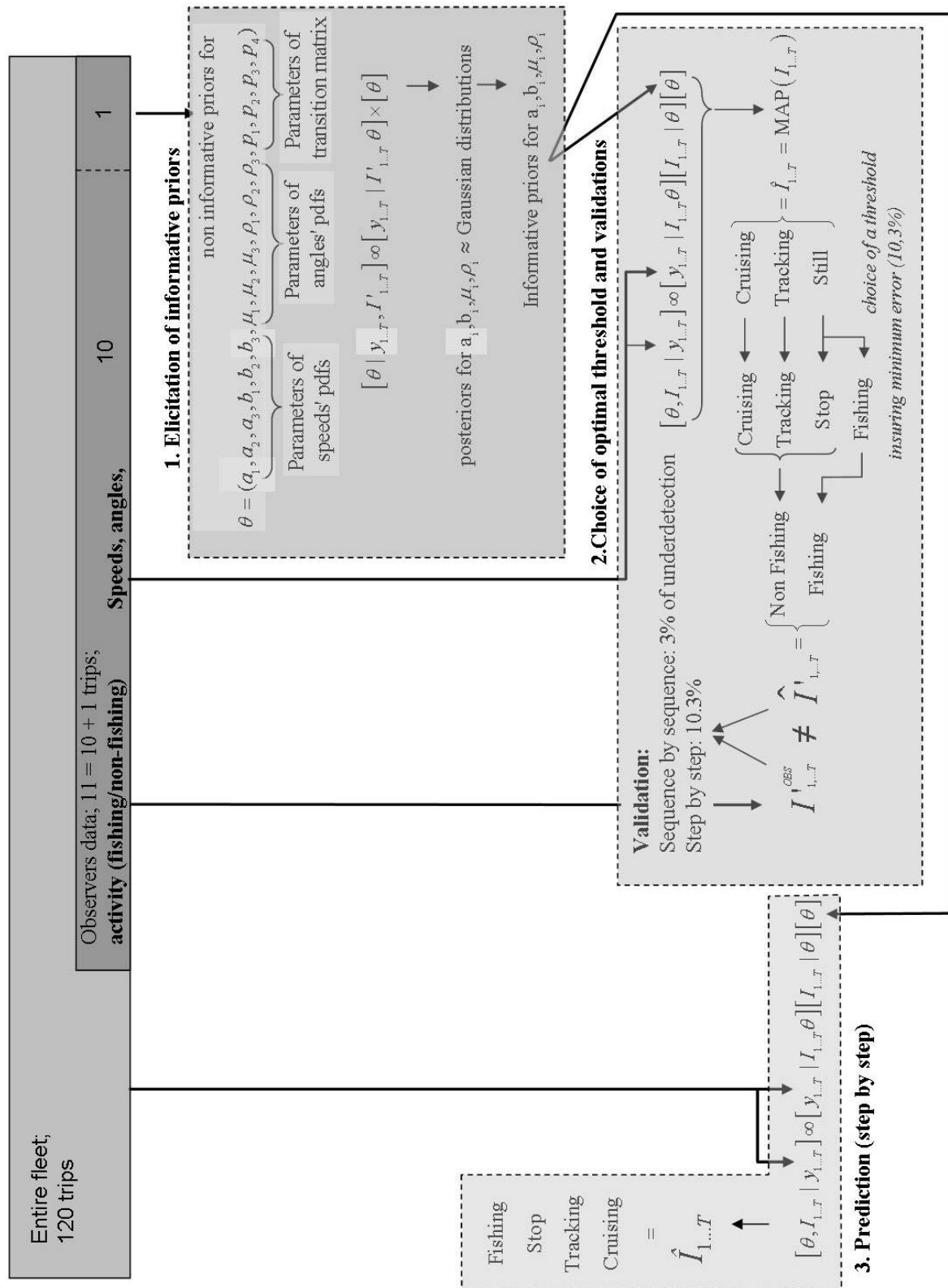


Figure 3

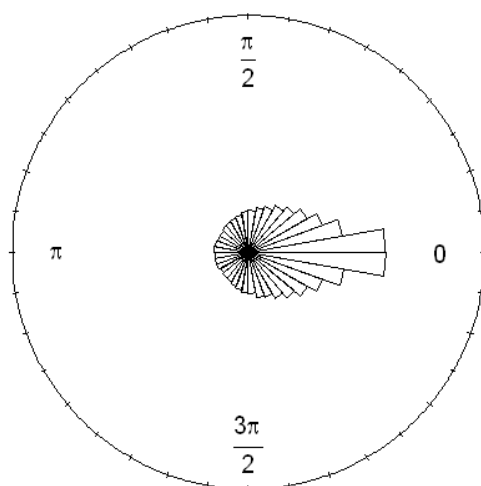


Figure 4

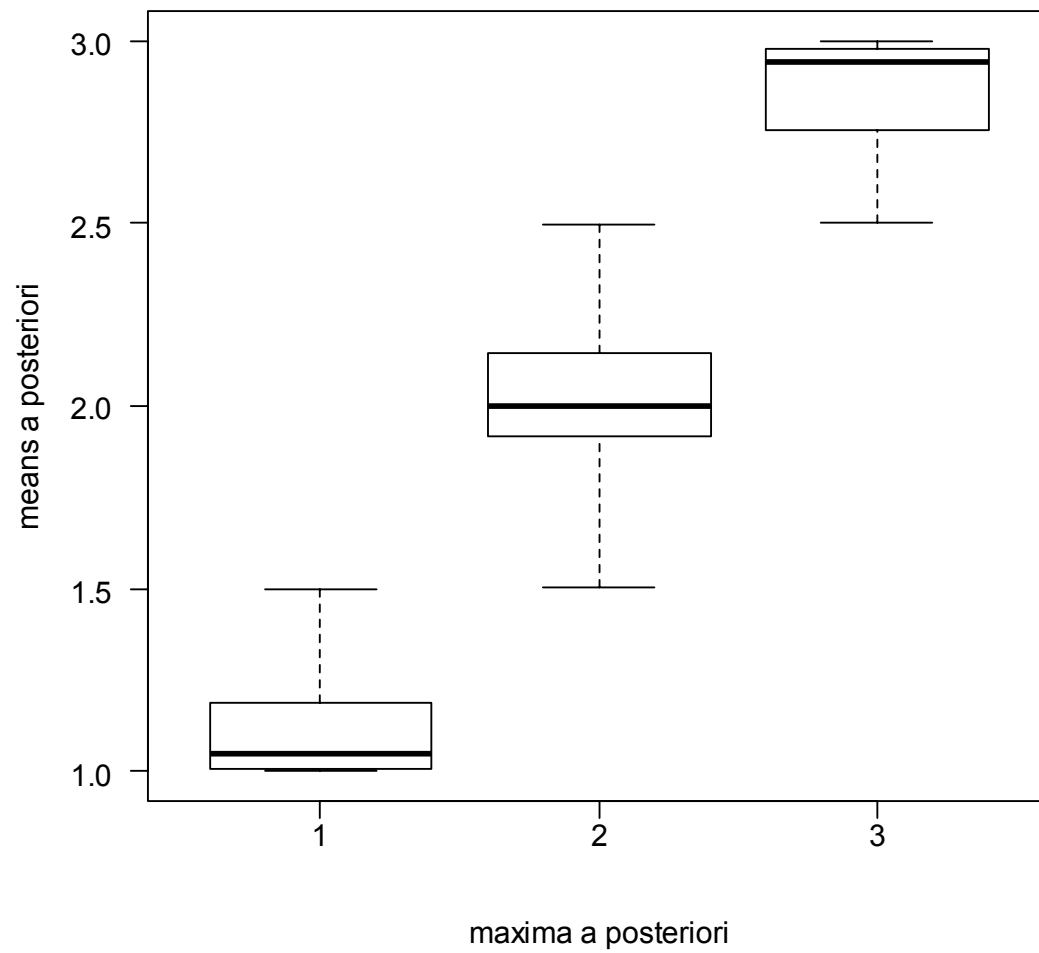


Figure 5



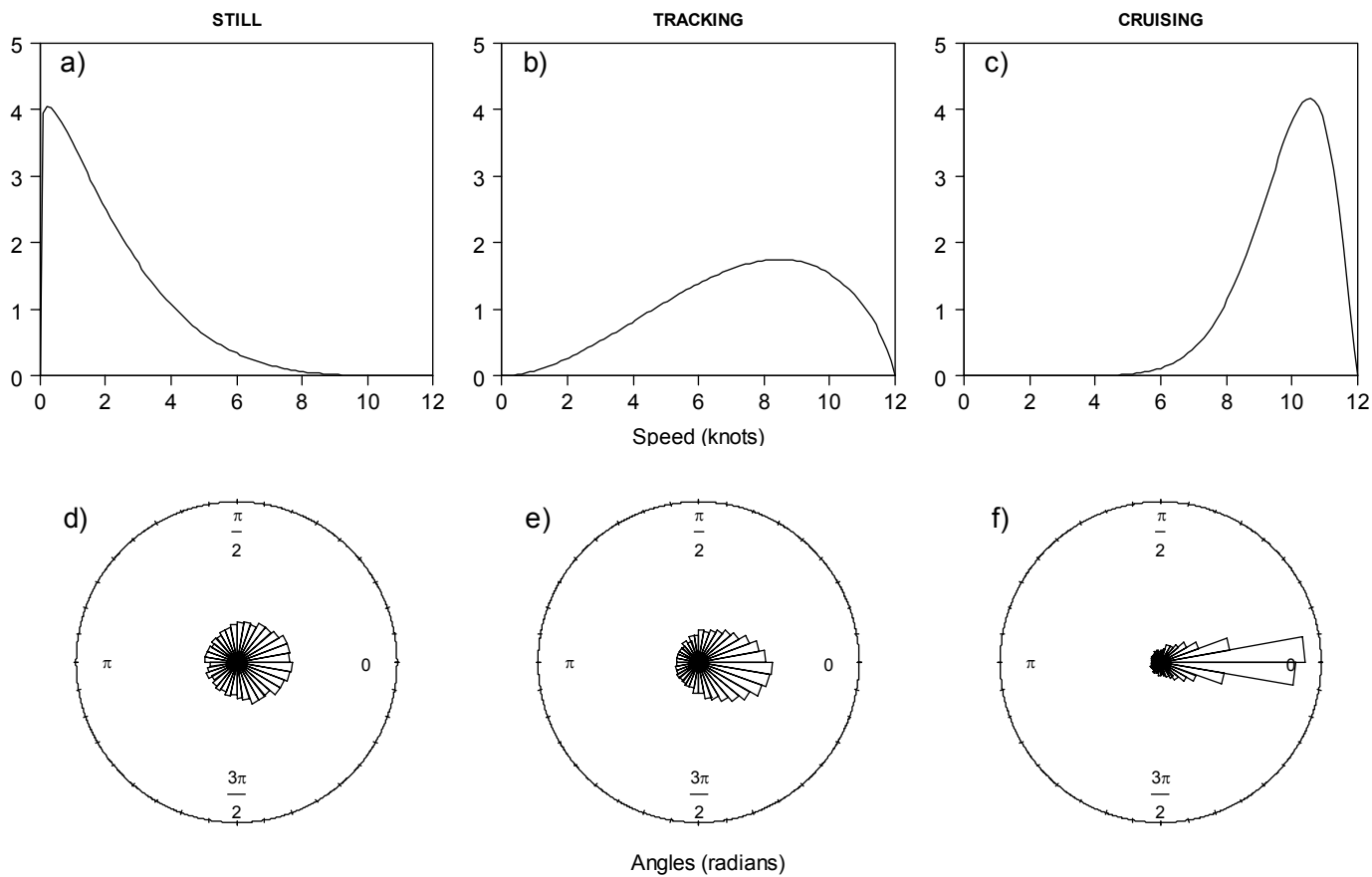


Figure 6

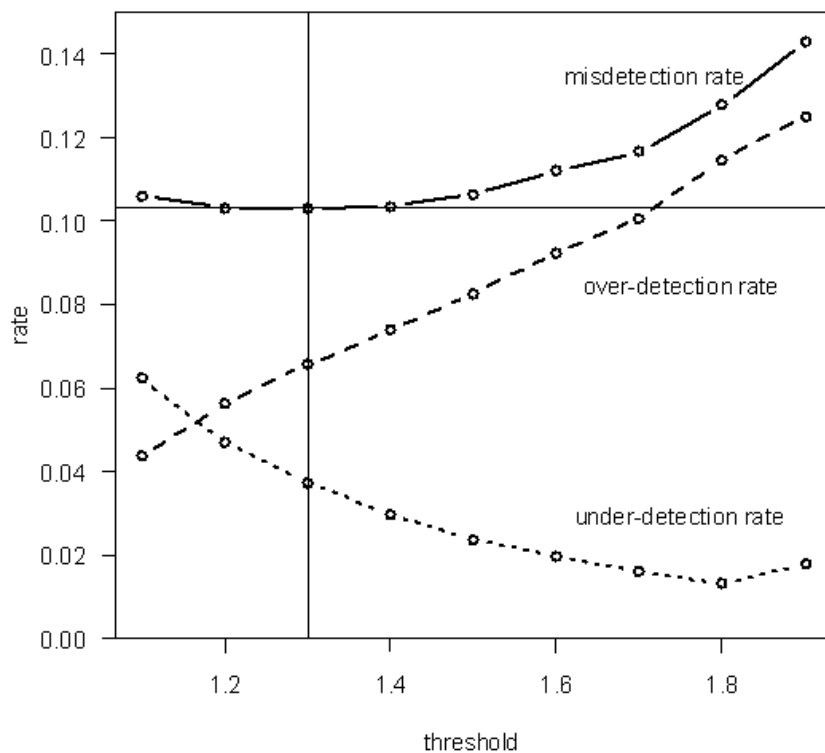


Figure 7

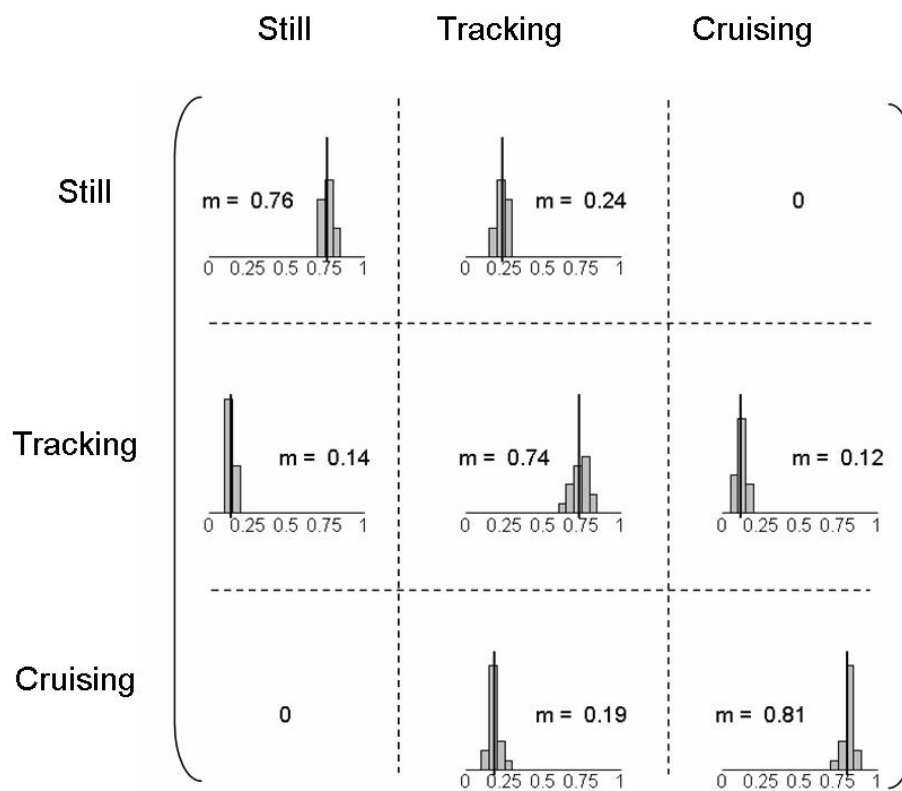


Figure 8

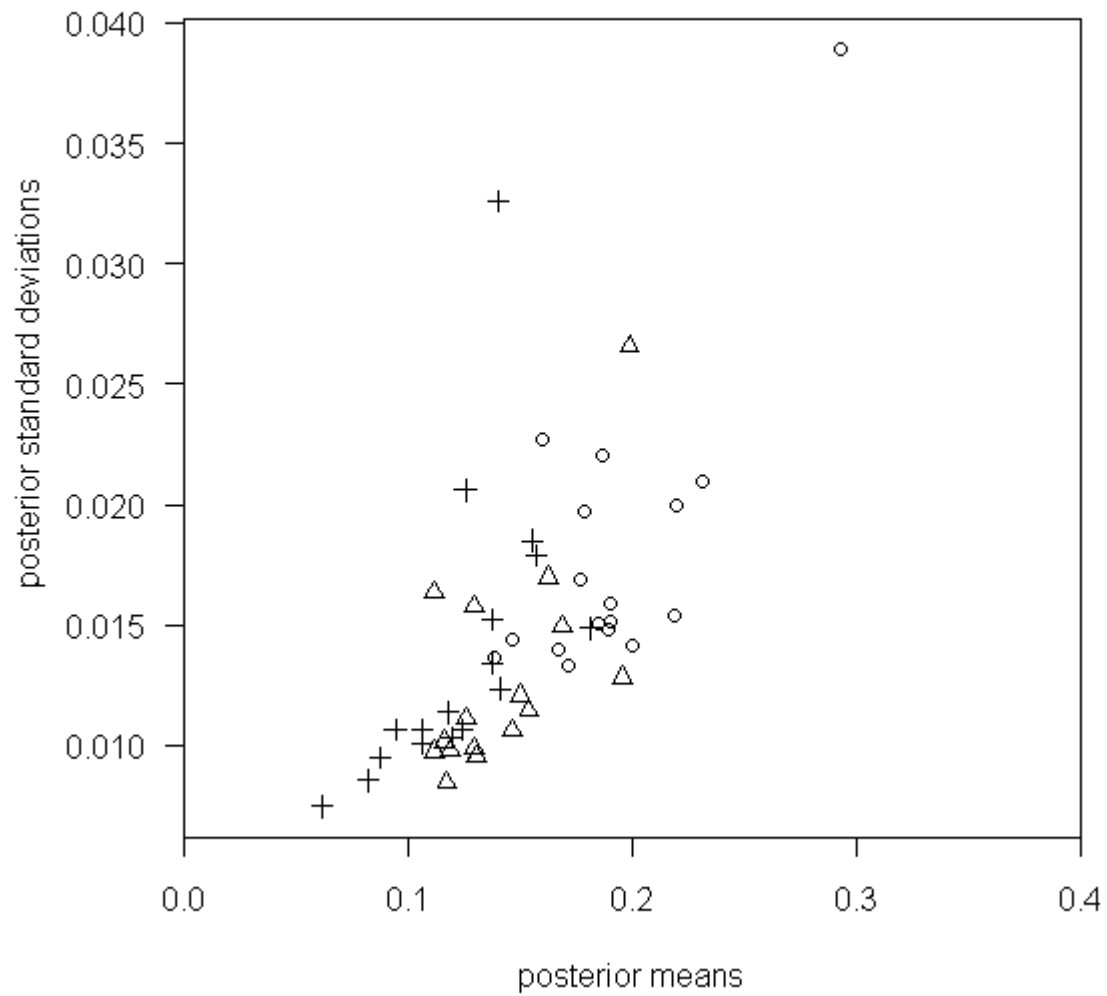


Figure 9

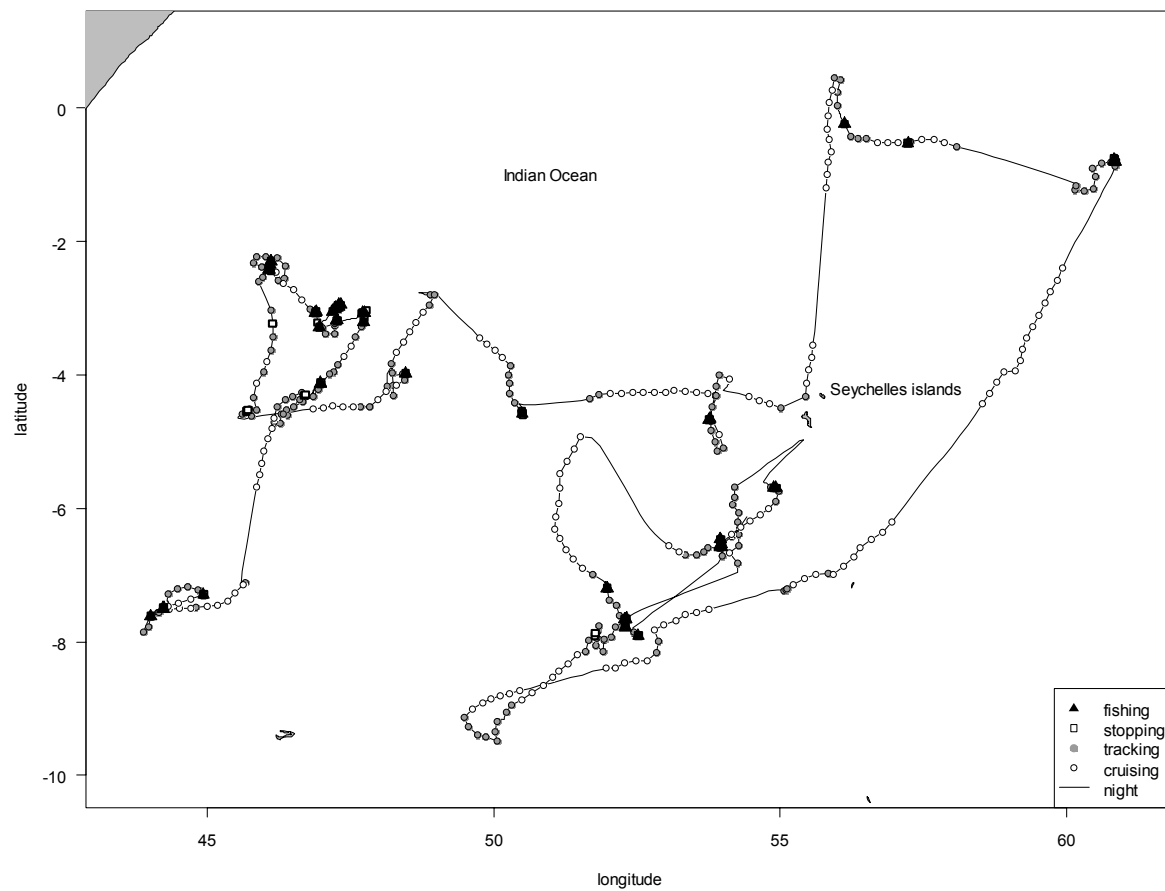


Figure 10



## ***CHAPITRE 4***

### **Activités des senneurs français tropicaux et cartographie de la probabilité de présence de thon**

Ce chapitre est rédigé, en anglais, sous la forme d'un projet de papier. Toutefois pour que son intégration au manuscrit soit rendue plus confortable, je n'ai pas pris soin d'inclure un paragraphe d'introduction puisque tous les éléments qui devront figurer dans l'introduction sont présentés dans les précédents chapitres de ma thèse.

### **RESUME du Chapitre 4**

L'objectif de ce chapitre est de cartographier un proxy de l'abondance des « proies », les thonidés à partir des trajectoires des thoniers senneurs français, les « prédateurs ». Comme cela a été expliqué dans les chapitres précédents, il n'est pas possible de réaliser des campagnes scientifiques de suivi de la ressource pour les thonidés de l'Océan Indien, du fait de la trop grande zone à échantillonner. Les seules données disponibles sont les données de pêche. L'idée est de se baser sur les trajectoires des thoniers senneurs, pour (1) affiner spatialement et temporellement le calcul actuel de l'effort de pêche, et (2) proposer le calcul d'un proxy spatial d'abondance de thon.

A partir des trajectoires VMS des thoniers senneurs français sur lesquelles ont été identifiées les activités de pêche, celles-ci ont été agrégées par cellule et par mois. Il a donc été possible d'analyser les composantes de l'effort de pêche (activités arrêt, recherche, et recherche-route) temporellement et spatialement. De plus, des indicatrices de niveaux de présence de thon ont été définies. On considère que dès qu'il y a eu une action de pêche dans la cellule, la présence de thon est avérée. Le poids est donc mis sur l'activité de pêche par rapport à l'activité recherche. De la même manière, lorsqu'il n'y a pas d'activité de pêche, le poids est plus fort pour l'activité de recherche que pour l'activité route-recherche. A partir des indicatrices, l'analyse variographique des variogrammes simples et croisés a été menée, et ainsi que le calcul du cokrigage d'indicatrices.

La combinaison des indicatrices cokrigées a permis l'élaboration de deux types de cartographie d'un proxy de présence de thon. Dans le premier cas, une carte à trois niveaux de probabilité de présence de thon (présence/présence potentielle/absence) a été définie en prenant l'indicatrice correspondant au maximum d'estimation par cokrigage. Dans le second, la combinaison linéaire des trois indicatrices a été calculée : les poids (1 pour l'indicatrice « pêche », 0.5 pour l'indicatrice « recherche active » et 0 pour l'activité « recherche-route ») ont été choisis arbitrairement pour respecter l'ordre d'importance entre les indicatrices. La cartographie de ces deux combinaisons d'indicatrices permet d'interpréter les trajectoires des senneurs comme proxy de présence de thon capturable. De plus, sur une zone délimitée, il devient possible de suivre ce proxy au cours du temps, qui pourrait jouer le rôle d'indice d'abondance.

### **From predators' tracks to preys' maps:**

### **To map the probability of tuna presence from Vessel Monitoring Systems trajectories.**

#### **a) Abstract**

The aim of this analysis was to estimate the prey, says tropical tuna, spatial distribution from the behaviour of one of its main predator (says fishermen). In open ocean, it is impossible to survey widely dispersed migratory fish populations and one can not avoid using fishing activity to assert features regarding these populations. To this end, we successfully used vessels' trajectories to infer tuna abundance distributions providing detailed distribution maps for tropical tuna communities.

First, one of four possible fishing activity was assigned to every step of the trajectories (Walker and Bez, submitted; Chapter 3). This relied on Markovian modelling of the trajectories inferred in a Bayesian framework knowing speeds and turning angles from VMS data of tropical tuna purse-seiners. Fishing activities were pooled by spatio-temporal cells of  $0.2^\circ \times 0.2^\circ \times$  month. To keep the disjunctive aspect of the basic information provided by vessels' behaviour we used three levels of the variable "activity" converted into three indicators.

Second, we assumed relationships between vessels' dynamics and tuna presence. We considered that:

- when a vessel stopped (fishing activity or stopping near a FAD or a school), the presence of tuna was proved
- when the vessel was in a tracking activity, this corresponded to sinuous trajectory associated to a lot of sightings: the probability of tuna presence is comprised between 0 and 1
- on the contrary, cruising, synonymous of a straight trajectory without any sighting, corresponded to a null probability of tuna presence.

The variables (fishing, tracking and cruising) are considered separately as indicators. The objective was to map a proxy of the probability of tuna presence from these three indicator variables jointly. With an approach of non-linear geostatistics, the method adapted to this objective was the indicators cokriging.

We showed that spatial structures were remarkably stable over the (short) time period of the present study (monthly in 2006, 2007, and 2008) and that levels of tuna presence were hierarchically nested in space. This emerged from the data and was not a property imposed by the model. However this was biologically highly sensible and served as a qualitative validation of the work. This indeed validated the assumptions made regarding the links between activities and tuna presence and validated our ability to extend spatially what was observed by the fishing vessels along their tracks. While no field truth will ever be available for such ecosystem, providing a workable method and a picture is not per se a validation. Providing biologically sensible maps was regarded as being a validation.



### b) Material and Method

To map a proxy of tuna presence, we used all activities estimated on VMS positions thanks to the Bayesian model. The model, for which a thorough description can be found in Walker and Bez (submitted), and in the chapter 3, proceeds in two phases.

#### *1-States and activities*

First, any hourly segment (step) of the trajectories was assigned to one of the three movement states defined for this study. The model consisted in a state-space model (Buckland et al. 2004, Royer et al. 2005, Patterson et al., 2008) where movement's states were assumed to follow an order one Markovian process. Although this framework has already been applied in other ecological issues (Morales et al., 2004, Jonsen et al., 2005), this was the first application to VMS data. States were inferred in a Bayesian framework (Gelman et al., 2004) knowing both vessel speeds and turning angles. Estimates corresponded to the state having the maximum a posteriori probability. The rationale behind the selection of the three states was the following. First, we expected a purse seiner to move quickly through abundance-poor areas. These “*cruising*” phases were associated to large speeds and to turning angles being predominantly around 0°. On the opposite, within areas where tuna schools are abundant, skippers try to track schools. In these “*tracking*” phases, apparent hourly speeds are expected to be smaller on average and turning angles should be widely distributed over the full circle. Finally, vessels can remain “*still*” for a while (fishing, school observations, engine break down, etc).

Second, thanks to observers' data, stillness steps were attributed to one of the two possible main activities compatible with the absence of movement, namely “*fishing*” and “*stopping*”. The “*fishing*” activity was attributed to steps where fishing was the dominant estimated activity, whereas “*stopping*” corresponded to a waiting time near a free-swimming school or near a FAD. Stops are required either to maintain electronic equipments located on FADs or to evaluate the effective presence of fishable schools. Long stops are sometimes due to technical break-downs and damages, although skippers try as much as possible to postpone the immobilization of the vessel until the night. Stops were thus considered as part of searching operations and contribute to the fishing effort.

The distribution of the time spent in each of the four activities in 2006, 2007, and 2008 was represented in figure 1 and 22% of time was dedicated to fishing and only 3% to stops at sea. The most important part of the time was dedicated to tracking activity (48% of the time) whereas the cruising time represented 27%.

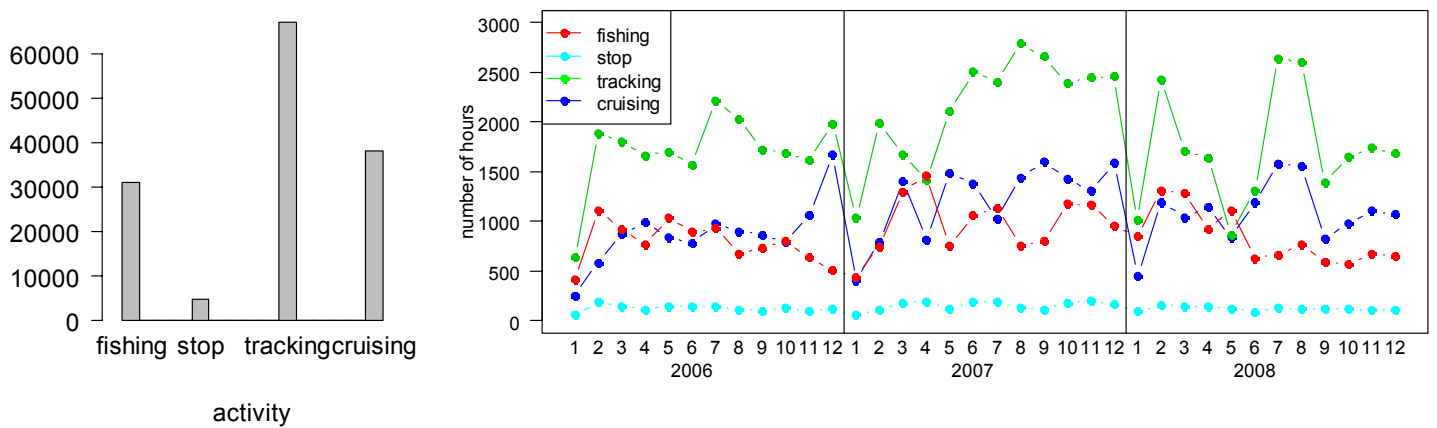


Figure 1: Distribution of hours in the four activities (fishing, stop, tracking, and cruising) and time series of the number of hours in the four activities, every month in 2006, 2007, and 2008.

## 2-Components of the fishing effort

To analyse the components of effort, the heterogeneity of the fishing activities among the vessels is highlighted in the box plots of distances covered in the activities “tracking” and “cruising”, for the time spent in the four activities. The spatial distribution of the activities is analysed with box plots according the areas (figure 2). The searching effort, as the time spent in the activities “stop”, “tracking” and “cruising” in each spatial square of  $0.2^\circ$  by  $0.2^\circ$ , is also mapped at a fine spatial scale, and compared to the maps of fishing sets. The observation radius of a tropical purse-seiner is about 12 nautical miles, which induced that when a vessel crossed a square of  $0.2^\circ$  by  $0.2^\circ$  in space, the whole cell is observed and sampled.

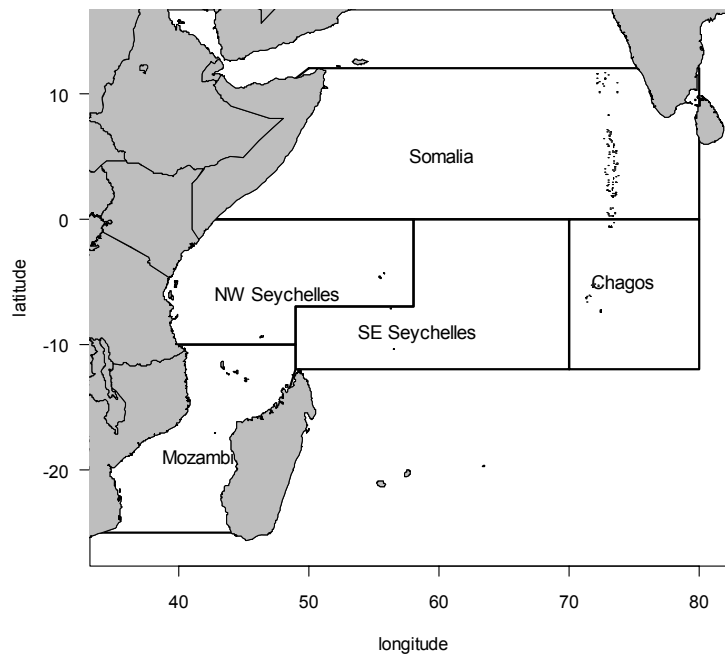


Figure 2: Principal fishing zones of the Western Indian Ocean for the French tuna purse-seiners.

*3-Mapping the tuna presence: Indicators' cokriging*

To map proxy of tuna presence, we use only the four activities “fishing”, “stop”, “track”, and “cruise”. Fishing and stops are considered together, because stops (3% of the total activity time) are negligible. Several steps will lead to map the proxy of tuna presence with the indicators' cokriging.

Thanks to the two phases of the Bayesian model, all VMS positions of purse-seiners fleet for a given month from 2006 to 2008 have an associated state “Still”, “Tracking”, or “Cruising”, which are the data used.

The point's data were then transformed into block data with a grid with 0.2° mesh. The use of a mesh smaller than the input mesh for For a given cell, the activity “Fishing/Stop” has priority over the activity “Tracking”, which has priority over the activity “Cruise”. When several points in a cell correspond to different activities, the “dominant” activity to the cell is attributed as follow.

The dominant activity of the cell  $v$  ( $A_{dom_v}$ ) is determined from the activities of the points ( $A_p$ ) in this cell, as follow:

$$A_{dom_v} = \begin{cases} 1 & \text{if at least one point is in activity } A_p=1 \text{ (fishing) or } A_p=2 \text{ (stop).} \\ 2 & \text{if there is at least one point in the cell with activity } A_p=3 \text{ (tracking) and no point in} \\ & \text{the cell with the activity } A_p=1 \text{ (fishing) or } A_p=2 \text{ (stop).} \\ 3 & \text{otherwise: no point in the block is in the activity } A_p=1 \text{ or } A_p=2 \text{ or } A_p=3 \text{ (tracking).} \end{cases}$$

Then the variable “dominant activity” in block ( $A_{dom_v}$ ) is used to define three indicators variables corresponding to each activity:

$$I_v^i(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } A_v^{dom} = i \\ 0 & \text{if } A_v^{dom} \neq i \end{cases}, \quad \text{with } i \in \{1, 2, 3\}$$

The next step of the methodology is the analysis of the variograms of the three indicators variables, with analysing and fitting of simple and cross variograms. Dealing with binary variable, the variograms can be interpreted in terms of probabilities (Rivoirard, 1994):

$$\gamma_v^i(h) = \frac{1}{2} E \left[ \left( I_v^i - I_{v+h}^i \right)^2 \right] = \frac{1}{2} \left( P \left[ I_v^i = 0 \text{ and } I_{v+h}^i = 1 \right] + P \left[ I_v^i = 1 \text{ and } I_{v+h}^i = 0 \right] \right)$$

Assuming symmetry, this reduces to:

$$\gamma_v(h) = P \left[ I_v = 0 \text{ and } I_{v+h} = 1 \right] = P \left[ I_v = 0 | I_{v+h} = 1 \right] \cdot P \left[ I_{v+h} = 1 \right]$$

Assuming stationnarity, i.e. assuming that the probability to be in dominant activity  $i$  is well approximated by the overall mean

$$P \left[ I_{v+h}^i = 1 \right] = P \left[ I_v^i = 1 \right] = p_i.$$

We finally get that:

$$\gamma(h) \propto P \left[ I_v^i = 0 | I_{v+h}^i = 1 \right]$$

i.e. that the variogram is proportional to the probability to be in another activity knowing that at a distance  $h$  this was not the case.

Cross-variograms are defined by:

$$\gamma_v^{i,j}(h) = \frac{1}{2} E \left[ \left( 1_v^i - 1_{v+h}^i \right) \left( 1_v^j - 1_{v+h}^j \right) \right] \# P[Adom_v = i, Adom_{v+h} = j]$$

They quantify the common patterns presented in the two signals (of the indicator  $i$  and the indicator  $j$ ).

#### *Analysis of the edge effect between the indicators*

In the Bayesian Hidden Markov model built by Walker and Bez (submitted, chapter 3), the transition matrix was constrained by no transition between the “still” state and the “cruising” state. But this hierarchy concerned only the individual vessels in 1D (along the time). Here the idea is to consider all vessels’ positions (aggregated in cells) in 2D, month by month and, to calculate if there is a hierarchical patch structure (to know if the “still” cells are encircling by “tracking” cells, which are encircling by “cruising” cells).

The edge effect is tested with the calculation of the following probability, translating with the following ratio of variograms (adapted from Rivoirard et al., 1994):

$$P[Adom_v \leq 1 | Adom_v \leq 2, Adom_{v+h} > 2] = \frac{\gamma_v^{1,3}(h)}{\gamma_v^{2,3}(h) + \gamma_v^{1,3}(h)} \quad (h \neq 0)$$

Because:

$$P[Adom_v \leq 1 | Adom_v \leq 2, Adom_{v+h} > 2] = \frac{P[Adom_v = 1, Adom_{v+h} = 3]}{P[Adom_v \leq 2, Adom_{v+h} = 3]} \quad (h \neq 0)$$

$$P[Adom_v \leq 1 | Adom_v \leq 2, Adom_{v+h} > 2] = \frac{P[Adom_v = 1, Adom_{v+h} = 3]}{P[Adom_v = 2, Adom_{v+h} = 3] + P[Adom_v = 1, Adom_{v+h} = 3]} \quad (h \neq 0)$$

$$P[Adom_v \leq 1 | Adom_v \leq 2, Adom_{v+h} > 2] = \frac{\gamma_v^{1,3}(h)}{\gamma_v^{2,3}(h) + \gamma_v^{1,3}(h)} \quad (h \neq 0)$$

If this probability increases with  $h$ , that indicates that edge effect exists and that there is a transitional spatial structure between the dominant activities, with patches of “still” cells (1) encircled by “tracking” cells (2), which are encircled by “cruising” cells (3).

#### *Indicators’ cokriging*

The cokriging of indicators is applied to map each indicator (of each dominant activity), taking into account the other indicators and their simple and cross-correlations in space. The indicators’ cokriging was calculated with a moving neighbourhood of  $5^\circ$  of diameter, and the model of variograms was fitted on the experimental variograms. The estimations were mapped in a grid with a mesh of  $0.1^\circ$ , and in a polygon defined by the zone sampled by the vessels during a given month. A grid of kriging smaller than the inputs grid induced smoothing of outputs.

The indicators cokriging (Rivoirard, 1994; Chilès and Delfiner, 1999; Webster and Oliver, 2001) provided the estimated probability of the indicator:

$$p_{i_v}^* = \lambda_0 + \sum_i \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{i\alpha} 1_v^i$$

The maps of estimation of the three indicators and the corresponding estimation variance maps were calculated for the 36 months of 2006, 2007, and 2008.

### *Mapping of the proxy of tuna presence*

The proxy of tuna presence is deduced from indicators cokriging: two different manners of calculation and representation of the proxy are chosen.

In a first representation, the rank of the indicator with the maximum value of estimation was attributed to each cell. The resulting map represented three levels of probability of tuna presence: high probability (when the indicator with the highest estimation is “stop/fishing”), intermediary probability (with the indicator “tracking”), and low probability (with the indicator “cruising”).

The second representation of the proxy of tuna presence was the calculation of a linear combination of the three indicators estimations from cokriging as follow:

$$p_v^* = 1 \cdot p_{I_1}^* + 0.5 \cdot p_{I_2}^* + 0 \cdot p_{I_3}^*$$

The choices of the coefficients are defined (arbitrarily) to reflect the decreasing importance of « fishing », « tracking » and « cruising » in the definition of a proxy of tuna presence.

### *4-Global estimation in a defined zone*

In order to follow tuna presence in time, the global cokriging in a central zone of the Indian Ocean (50°E-55°E, 10°S -5°S) has been calculated to estimate the value of each indicator for every month of the three studied years, and the corresponding variance. The time series of the linear combination of indicator variables represented the changes of tuna abundance index in this zone.

The estimations and variances are depending on the size of the defined zone of global cokriging. The same linear combination as previously has been applied to the results of global cokriging, in order to aggregate the indicators results in a sole variable.

## **c) Results**

### *Preliminary results*

Preliminary results are the distribution of the components of fishing and fishing effort (number of hours devoted to every activity), per quarter, per zone of Indian Ocean, and spatial distribution.

The box plots of the number of hours devoted to cruising increased all along the year and had the same pattern for the three years (Fig. 3a). The inter-vessels variability for the activity cruising was not so important. However, the variability between vessels for tracking activity is high (Fig.3b). The time dedicated to stop is very low and about 5% of the total time of activity (Fig.3c). The pattern of the time in fishing is not clear, but the inter-vessels variability is low (Fig. 3d). The means of time devoted to cruising and fishing were about a half of the mean of time in tracking, and the mean of time in stop is very low: these results relied to the distribution of the four activities for all the period (fig.1).

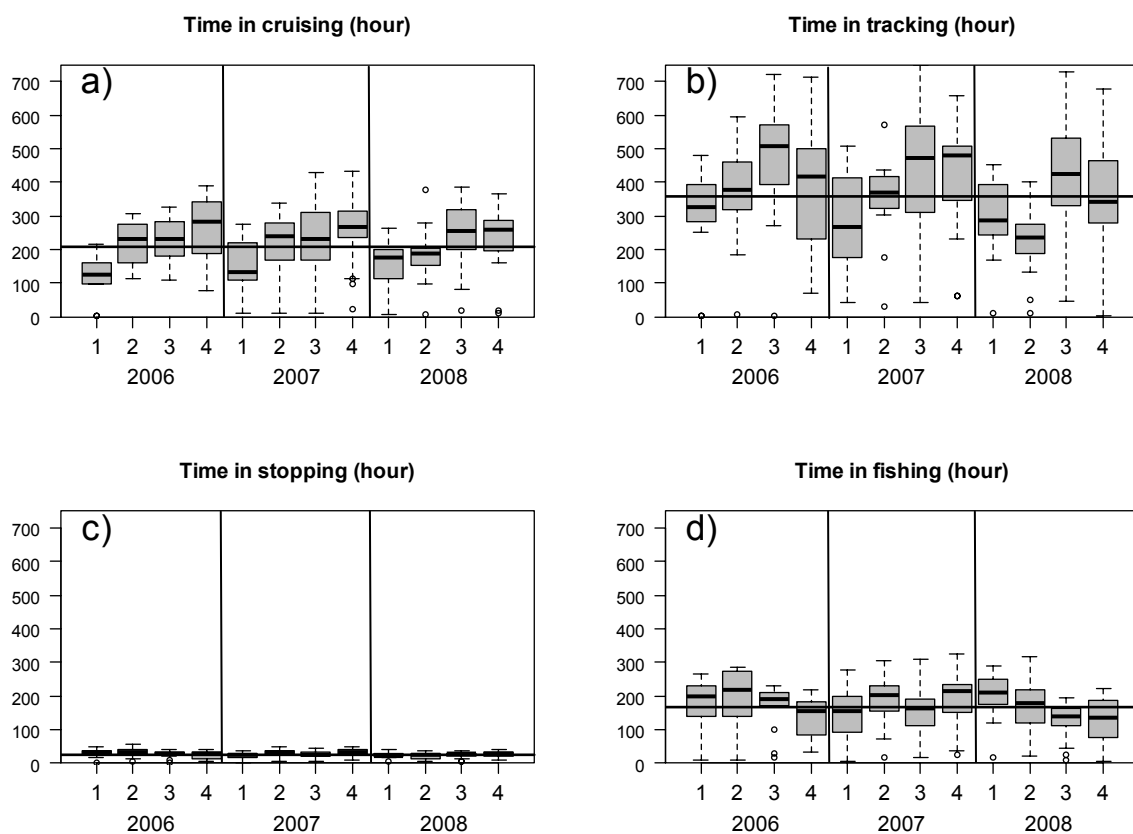


Figure 3: Box plots of time in activities by quarter in 2006, 2007 and 2008. The solid line represents the mean of all the values.

The pattern of the distribution of time devoted to the activities is very similar for the four activities, with high levels of time in activities in North-west Seychelles, and then in South-East Seychelles and Somalia (Fig. 4). The inter-vessels variability is more important for the year 2006, than for the two others.

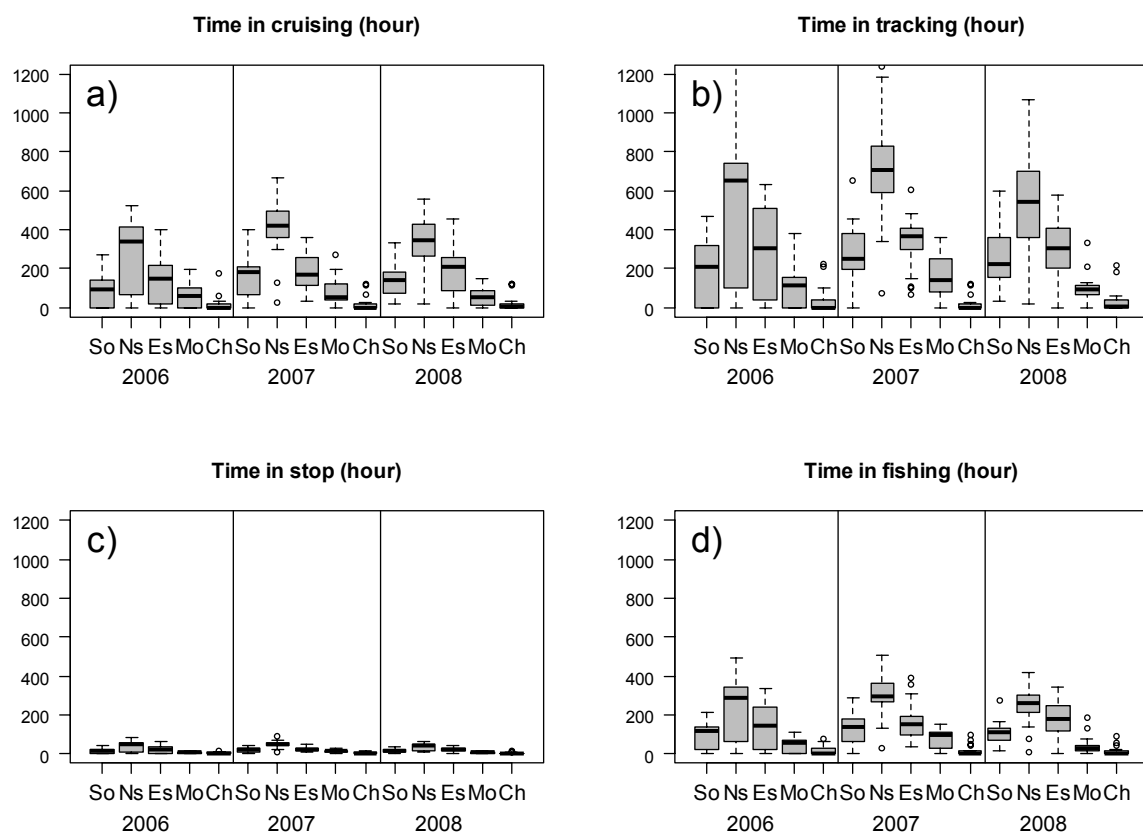


Figure 4: Box plots of time in activities by zone of Western Indian ocean: Somalia (So), North-West-Seychelles (Ns), South-East-Seychelles (Es), Mozambic Channel (Mo), Chagos (Ch).

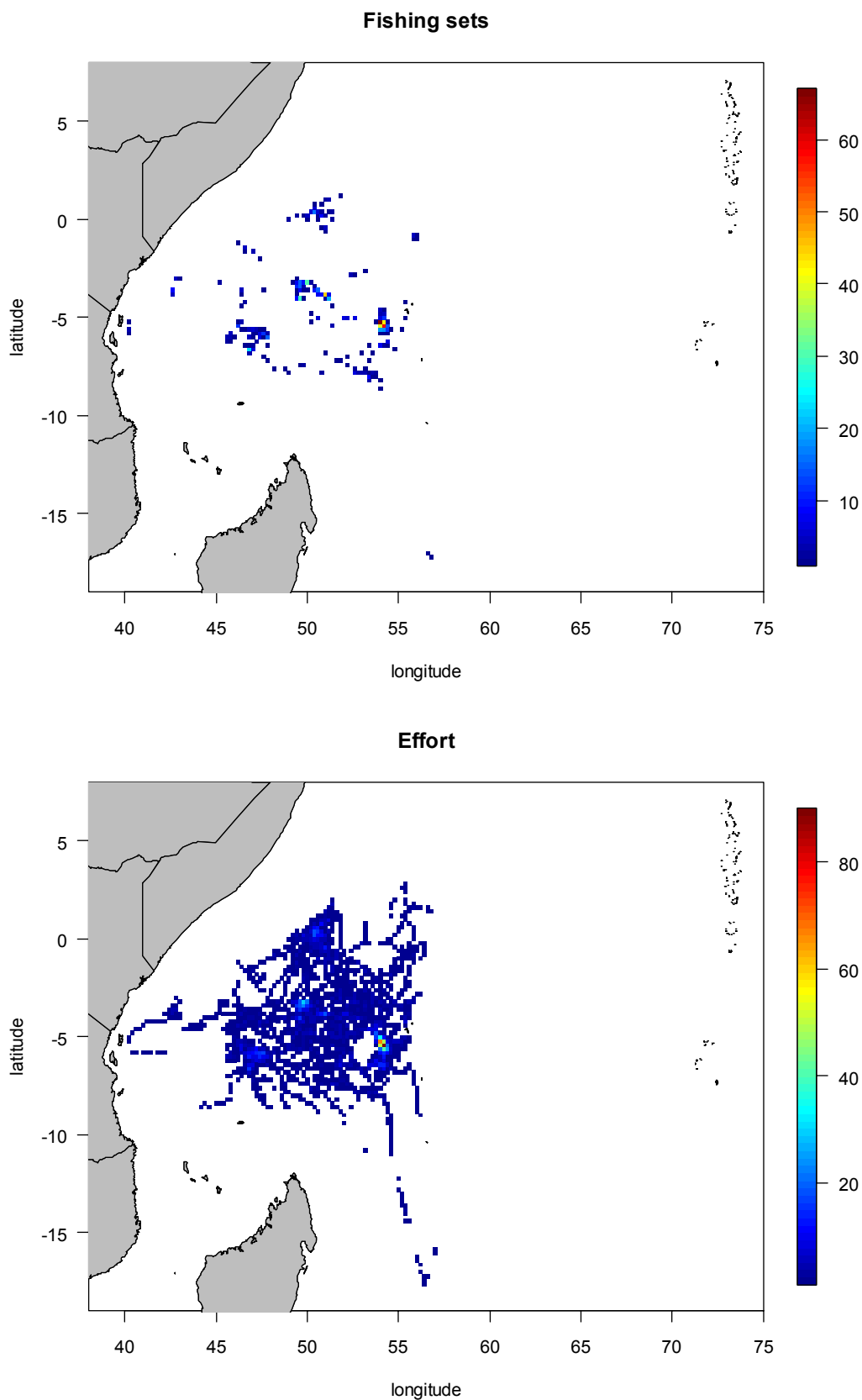


Figure 5: Maps of fishing cells and effort cells (June 2007).

The spatial distribution of fishing and effort (activities stop, tracking, cruising) was represented in two example maps (Fig. 5). In each cell, the numbers of hours in fishing and in fishing effort were calculated every month for all vessels and then mapped. The spatial distribution of the effort is large,



compared to the spread of the fishing cells. The fishing activities were very concentrated in a few cells of  $0.25^\circ$  by  $0.25^\circ$ . Few cells comprised a high number of hours in fishing (more than 50 hours) which corresponded to a high number of hours of effort, although the majority of cells corresponded to a low number of hours of effort. The maps of fishing sets from logbooks data can only be built in  $2^\circ/2^\circ$  mesh of grid (because of the quality of data, chapter 2) that is too large, according to the present map of spatial distribution of fishing hours. That highlighted the interest of VMS data for spatial analysis of tuna purse-seiners fishery.

### Variographic analysis

The simple variograms and the cross variograms of the activities (fishing and stop together, tracking, cruising) were calculated every month in 2006, 2007 and 2008 (Fig.6), thanks to the package RGeoS (Renard and Bez, 2008). The simple variograms were all increasing, and there was not a strong variability between them. These variograms could easily be summarized by the mean variograms (solid lines in Fig.5). The cross variograms were quite all decreasing and the variability between the months was not so high. Each of simple and cross variograms is fitted by a model defined by two spherical models and a nugget effect. The ranges of the simple variogram for “Stop/fishing” is small, then this one for “Tracking” is medium, and finally, the range for “Cruising” is quite large. The spatial structure of the activities and the spatial relationship between the activities was confirmed by the form of the simple and cross variograms.

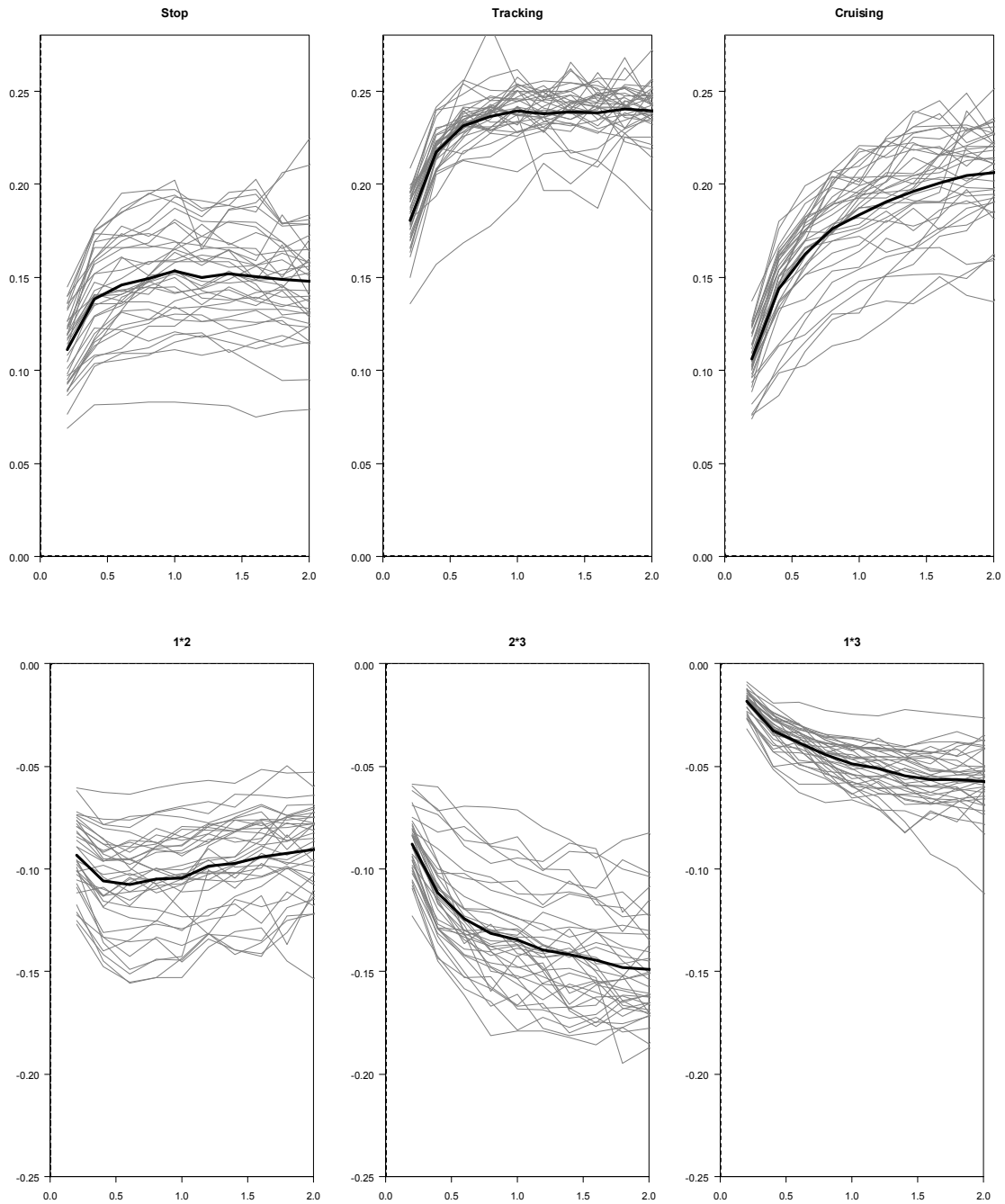


Figure 6: The simple and cross variograms for the activities “stop/fishing”(1), “tracking”(2), and “cruising”(3), for the 36 months of 2006, 2007, and 2008 are represented in grey. The black line represents the mean of the 36 variograms. The cross-variograms for the activities “stop”/ “tracking”(1\*2), “tracking”/“cruising”(2\*3), and “stop”/”cruising” (1\*3).

#### Edge effect

The probability of edge effects was calculated by:

$$\frac{\gamma_v^{1,3}(h)}{\gamma_v^{2,3}(h) + \gamma_v^{1,3}(h)}$$

The ratio of variograms was calculated for every month (fig. 7) and all the ratios are growing with the first values of the class of distance (h). This revealed that there was an edge effect in the structure of

the activities: the patches of “stop” activity points were included in patches of “tracking activities”, which were included in patches of “cruising” activities.

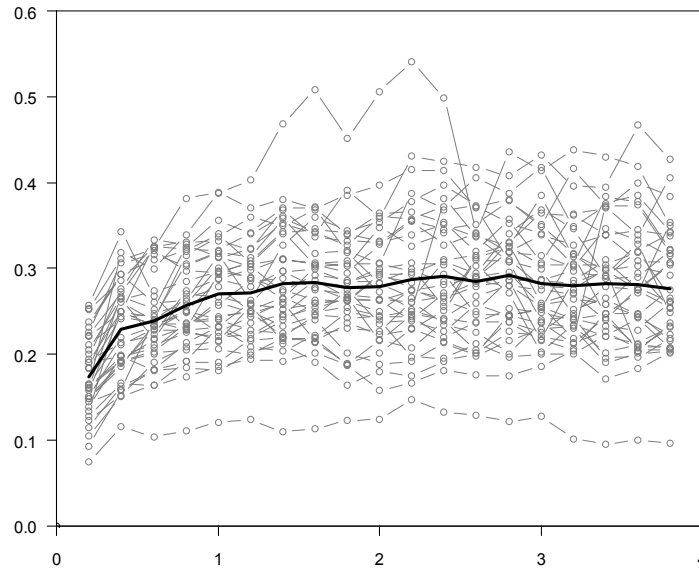


Figure 7: The ratio of variograms to highlight the edge effect.

#### Indicators cokriging

The cokriging maps were calculated for the activities (stop/fishing, tracking, cruising), in the zone sampled by the fleet during the given month. An example of the estimation maps for one month in 2007 (3 maps of indicators' estimation, and 3 maps of estimation variance) highlighted a few patches of fishing/stop, which are encircled by zones of tracking and zones of cruising (Fig.8). The maps of estimation variance meant the spatial distribution of sampling effort by the fleet.

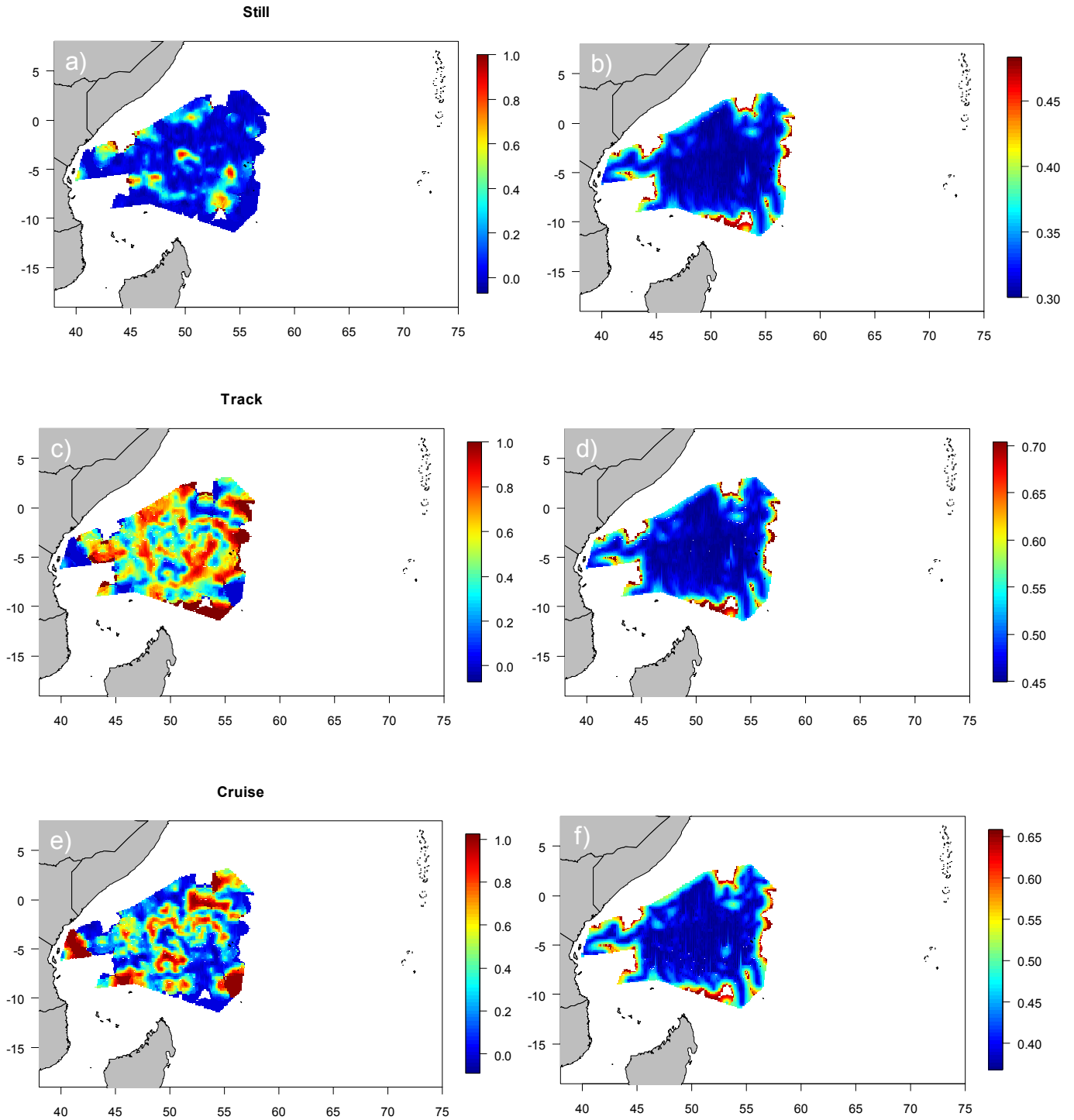


Fig. 8: Example of the estimation maps of cokriging of the 3 indicators for June 2077, “still”, “tracking”, “cruising”. The three maps of indicators’ estimation are the maps a), c), and e), and the three maps of corresponding estimation variance in b), d), and f).

#### Combination of cokriging estimations

Two different manners of combination of cokriging estimations were mapping as follow. In the first one, the value of each cell corresponded to the indicator with the maximal estimation (fig. 9). In the second one, the value of each cell corresponded to the following linear combination (fig. 10):

$$p_v^* = 1 \cdot p_{1_v}^* + 0.5 \cdot p_{1_v^2}^* + 0 \cdot p_{1_v^3}^*$$

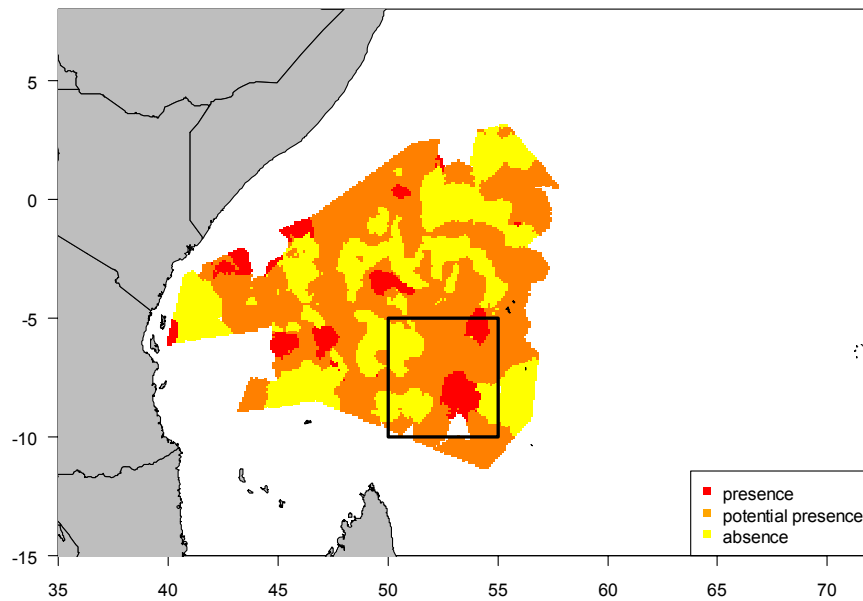


Fig. 9: Map of the proxy of tuna presence from the 3 indicators cokriging (June 2007). The block 50°E-55°E, 10°S-5°S is used to calculate global kriging for the time series of every level of tuna presence.

The proxy of tuna presence was built from the combination of the three indicators cokriging. The map of this proxy allowed delimiting spatially zones of tuna presence (from fishing zones), of potential presence of tuna (from tracking zones), and of absence of tuna (Fig. 9).

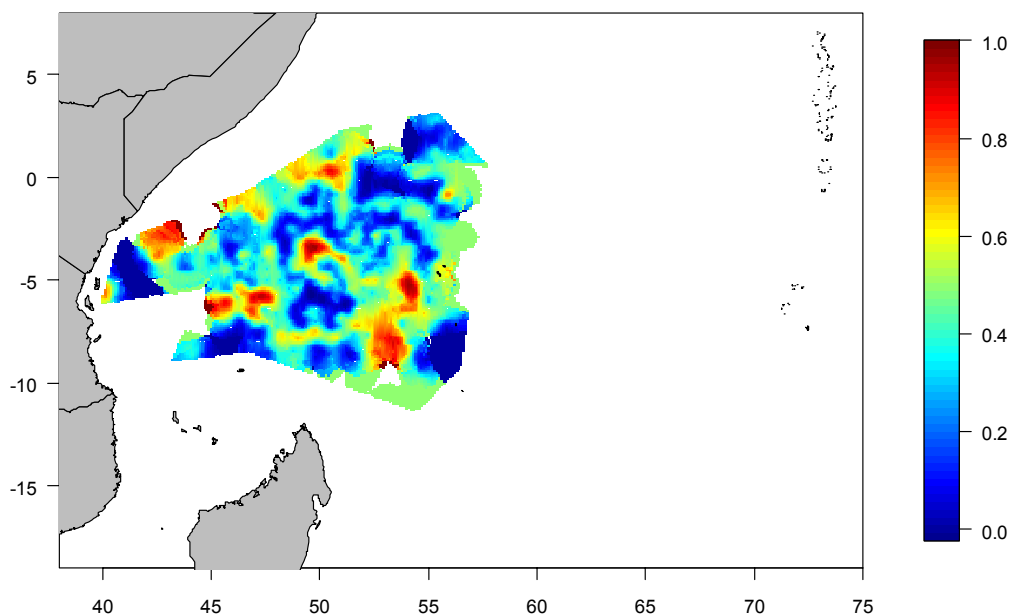


Fig. 10: Map of the proxy of tuna presence as a linear combination of the indicators variables.

The map of the linear combination showed the same pattern of high probability of tuna presence as the map of the maximum of cokriging estimation. This second representation of a proxy of abundance is smoother because of the continue value of the linear combination (fig. 10). The edge effect highlighted by the ratio of cross-variograms is checked visually with the patch structures of tuna presence encircled by potential presence areas, and finally by absence of tuna areas.

Relatively to the areas sampled by the French purse-seiners fleet, the proxy of presence of tropical tuna can be represented by the combination of the activities. Thanks to indicators cokriging, activities on vessels trajectories have been translated as a proxy of tuna presence with a spatial sense.

### *Time series of global kriging in a block*

As for the maps, time series of global kriging are plotted in two different manners. The time series of global kriging for every level presence are represented with the variability around the estimations (fig. 11). The second representation is the time series of the linear combination of the three variables (fig. 12).

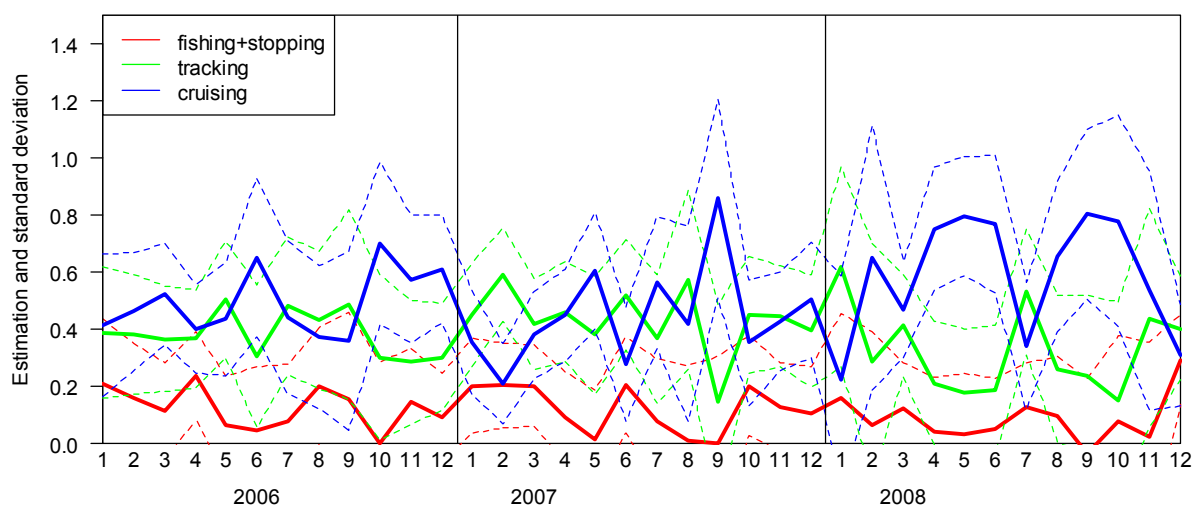


Fig. 11: Time series of activities distribution in a central zone (50°E-55°E, 10°S-5°S). The solid lines are the global estimations on the block for the three levels of presence, and the dotted lines correspond to the estimations plus and minus the corresponding standard deviation.

The global estimation of the three levels of tuna presence was calculated for an area (50°E-55°E, 10°S-5°S) in the South-West of the Seychelles islands, and is followed all along months from 2006 to 2008 (Fig.11). For the highest level of tuna presence (from fishing indicator), the pattern is quite the same for the three years: between 10% and 20% of fishermen time is devoted to fishing except in May and/or June, and September or October which have no time devoted to fishing. Estimations of tracking and cruising time are very variable, with a trend in 2008 to decrease for tracking and to increase for cruising.

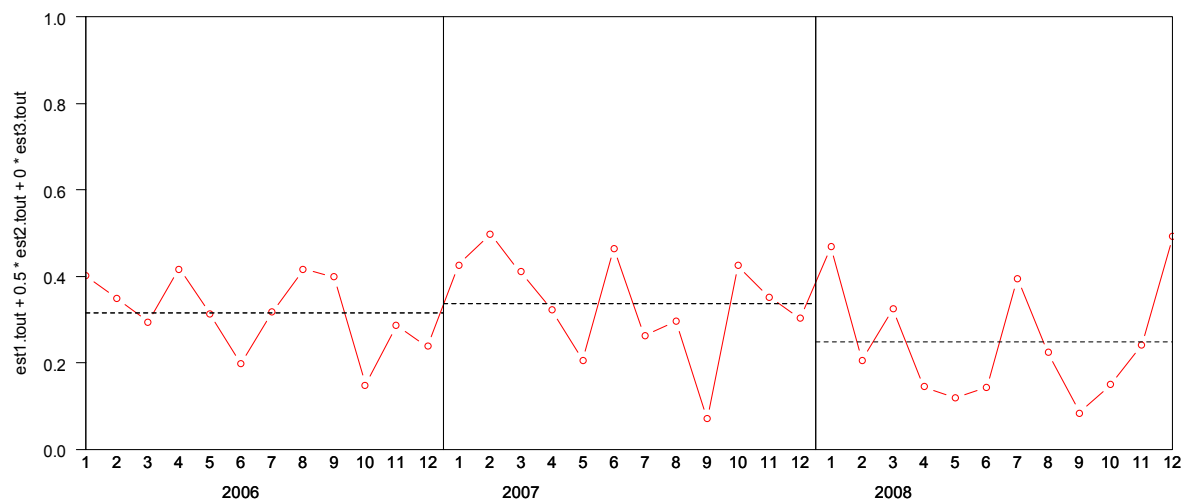


Fig. 12: The linear combination of “still”, “tracking” and “cruising” time series from the global estimation on the central zone (50°E-55°E, 10°S-5°S). The dotted lines are the means year by year.

The linear combination of the global kriging on the defined area (50°E-55°E, 10°S-5°S) is plotted as a time series from January 2006 to December 2008 (fig.12). The one is very fluctuant according to the months, due to the seasonality of fishing areas. However, a decreasing trend of the annual mean of the presence proxy was shown.

#### d) Discussion

##### Fishing effort

There were many applications of VMS data in different fishery studies (Bertrand et al., 2005, Witt et al., 2007, Mills et al., 2007) but none focussed on the determination of the different movement states during a fishing trip. The model on VMS data used in the present study has been validated on the activities “fishing” versus “no fishing”, on the subset of VMS for which we have simultaneously observers’ data. The misdetection rate which was obtained on the steps was about 10%. The interpreted trajectories gave information on fishing effort at small scale.

To assess exploited species stocks, scientists calculate Catch Per Unit of Effort (CPUE) as relative abundance and monitor the variations of the time series. The qualification of every step of vessels’ trajectories induced the accurate quantification of components of fishing effort of French tuna purse-seiners. Building abundance indices from commercial CPUEs remain problematic for many reasons: non-proportionality between CPUEs and abundance, such as hyperdepletion and hyperstability (Hilborn and Walters 1992, Harley et al, 2001, Polacheck, 2006), changes in fishing power (Fonteneau et al., 1999) or in fishing grounds (Walters, 2003) over the years, etc. Even if these criticisms remain valid at a global scale, improvements in the definition of individual fishing effort, and specifically the determination of the proportion of active versus inactive time, can be obtained from the information on small-scale activities. The spatial combination of all vessels’ activities gives the very important information of zones without any tuna observed (in surface), thanks to “cruise” activities. Such an information is nowhere else available.

However, in the objective to avoid problems linked to proportionality between CPUE, the methodology based on indicators’ cokriging was adopted to map a proxy of tuna’s presence based on fisheries data.

### Variographic analysis

The variographic analysis revealed that spatial structures of each indicator are consistent and stable in the time. This stability validated, a posteriori, and in a qualitative manner, the choice of three unique states for all vessels and all seasons.

### Indicators' cokriging

The interest of the method of indicators' cokriging was to map the different levels of a categorical variable. The categorical variable is split into several indicators functions. Indicators cokriging allows representing the spatial distribution of the indicators, taking into account the covariations between them. When the indicators are disjunctive and intrinsically correlated, this method is similar to the disjunctive kriging (Rivoirard et al., 1994).

The method of indicators' cokriging is currently applied in mining or pollution contexts, where, most of the time, indicators represent the probability of the cut-off (quantity of metal or pollutant higher than a threshold) in a given block (Matheron 1973b, 1976a ; Rivoirard et al., 1994). This difference in the considered variable induced differences in the calculation of the edge effect and in the combination of the 3 indicators for a summary map of the abundance's distribution.

In marine fields, kriging methods were currently used to map species distribution from surveys (Rufino et al., 2004 ; Faraj and Bez, 2007 ; Woillez, 2007), but disjunctive kriging was only used by Petitgas (1993) to map herring densities estimation from acoustic fisheries surveys, and by Lembo et al. (2000) to localize the prawn nurseries zones.

Finally this work was the first one interpreting marked trajectories into presence's probability of fish maps, as a proxy of the abundance.

### Methodology's choices

The method allowed mapping in a fine scale (grid of  $0.1^\circ$  mesh) the proxy of tuna presence. The grid size of aggregated data of activities ( $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ ) was justified by the radius of observation (birds' radar and binoculars) around the boat. The cokriging of indicators is mapped in a grid with a smaller mesh grid ( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ) than the grid of inputs that induced smoothing of the estimation map.

We assumed the existence of a link between the fishermen activity and the probability of presence of tuna, with the hypothesis that "cruising" means that probability of tuna presence is null, "fishing/stop" means that the probability of tuna presence equals to 1, and "tracking" induced intermediary probability. According to the interpretation of "stop" activity, one may not be relied to estimation of the proxy of tuna presence. Indeed some stops may be fishing: in this case, the estimation reflected really the tuna presence probability. But stops may be also due by repairing or maintenance in FAD (Fish Aggregating Devices): in this case, the interpretation of "stop" activity is not a proxy of tuna presence.

This case is very marginal: the stops occurred in 5% of the hourly activities and this type of stop is only one reason among the causes of stop.

Quantifying the probability of tuna presence when a vessel is in tracking activity is not feasible, that is why the indicators cokriging appeared as a good solution not to impose a level of probability, but to conserve the hierarchy of presence probability.

The interest of using VMS data instead of logbooks data filled by fishermen, to calculate the fishing effort (and the relative abundance of tuna) lies in the fact that the collection of data did not depend on the cooperation of fishers, and allowed the accuracy of recorded positions (thanks to GPS) contrary to the rough positions noted by the skippers. For these reasons, there is no temporal or spatial gap



between the estimated fishing sets and the real fishing sets and no human errors: except 10% error of the estimation of activity on steps, the estimated fishing steps are accurately located.

In the Bayesian model (chapter 3, Walker and Bez, submitted), in the transition matrix, we chose to prevent two consecutive steps from being associated to “cruising” and “stop” states, a “tracking” step was required between two steps in “cruising” and “stop”, or “stop” and “cruising”. This constraint on the activities estimation occurred on the individual trajectories along the time. The edge effect highlighted with the calculation of a ratio of variograms showed a hierarchy in the spatial distribution (“stop” and “cruise” cells are separated by “tracking” cells). The patch structure of tuna fishing is thus proved, corroborated with previous studies based on observations (Fonteneau et al., 1999) and validated a posteriori the choice of three ordinal activities.

The temporal scale chosen is the month: when the probability of presence is maximal, the presence of tuna is proved for a while during a given month. The temporal scale can be changed with the constraint of spatial extend conditioned by the sampling spread of the fleet. The main advantage of VMS data is the accuracy and the high frequency of the data: the spatio-temporal scale of future analysis can be defined differently from the one in this study ( $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ} \times \text{month}$ ).

It is important to note that this methodology concerned only the tuna caught in surface: seine fishery allows catching only to 200 meters deep contrary to longline fishery for example. The estimation maps are produced from data of the French purse-seiners and not of all the fleets fishing the tropical tuna in the Indian Ocean. The estimation maps of tuna presence represented only this part of the total stock. This study may be considered as a pioneer use of VMS data to approximate the abundance of an exploited species at a fine scale, when no scientific assessment campaign can be undertaken. A perspective of this work is the application of the approach to all the fleets exploiting the tropical tuna in the Western Indian Ocean. The estimation maps would reflect the real spatial distribution of tropical tuna in the fishing zones.

The main advantage of the production of tuna presence maps is to follow the spatial distribution along the time. The monitoring of a zone regularly sampled by the fleet required the time series of the abundance in this zone: the methodology developed on VMS data allowed analysing indices of abundance’s time series, with a spatial sense.

### Conclusion

VMS data are very profitable concerning the accuracy and exhaustiveness of the data, but required some statistical developments to make them usable for a thorough interpretation of fishing effort. The application of the Bayesian state-space model allowed us distinguishing two types of “searching” behaviours: the tracking and the cruising activities.

The combination of indicators cokrigin estimations brought to map at fine spatial scale, a proxy of presence/absence of tuna in surface, in the fishing zones sampled by the French tuna purse-seiners. It becomes possible to determine tuna concentrations from patches of tuna presence and to follow along the time, the combination of activities as an abundance proxy.

## **DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSIONS**

### **Discussion sur les choix méthodologiques**

Une trajectoire se définit communément comme « la ligne décrite par un point matériel en mouvement, et notamment par le centre de gravité d'un projectile » (Larousse 2001). Les trajectoires décrites par les animaux, comme par les êtres humains, présentent l'intérêt de révéler une partie du comportement des individus, au travers des caractéristiques de leur déplacement dans l'espace. Outre la mise en place de boîtier VMS sur les navires de pêche, le développement récent de technologies de positionnement spatial puis leur miniaturisation a accru le nombre d'animaux sur lesquels ont été posés des appareils équipés d'émetteurs de transmission par satellite et/ou de GPS (Fauchald and Tverra, 2003 ; Weimerskirch et al., 2004 ; Royer et al., 2005 ; Block et al., 2005, Dagorn et al., 2006 ; Jonsen et al., 2006 ; Gaspar et al., 2006, Gurarie et al., 2009). Le comportement spatial peut être induit par les contraintes physiologiques et environnementales de l'individu. L'étude de ces trajectoires permet d'améliorer l'état des connaissances sur les interactions prédateurs-proies, le comportement de recherche de nourriture, ou encore les migrations saisonnières.

La contribution des statistiques spatiales pour la modélisation et l'interprétation des données de trajectoires d'individus est importante, mais se limite souvent à des applications possibles aux trajectoires échantillonnées à pas (de temps ou de distance) réguliers ou bien par des « mouvements ». Les mouvements sont délimités par les points de rupture de la trajectoire qui ont lieu à chaque changement notable de la vitesse ou de l'angle de changement de cap (Turchin, 1998).

Les trajectoires sont couramment modélisées comme des marches aléatoires, corrélées ou non, biaisées ou non. Les modèles appliqués sont ainsi des modèles à espaces d'états, markoviens ou non, calculés par des méthodes de maximum de vraisemblance ou des méthodes bayésiennes (MCMC, filtres particuliers par exemple).

Le modèle appliqué aux trajectoires décrites par les données VMS (Vessel Monitoring Systems) a été construit sur des données régulières de pas de temps horaire. L'hypothèse du caractère markovien d'ordre 1 des états, les paramètres des distributions de vitesses et d'angles, ainsi que les probabilités de transition sont donc calculés sur la base de données horaires. Les données VMS disponibles pour les thoniers senners français sont composées de données « intermédiaires » en plus des données horaires. Introduire les données de positions autres que les positions à heure pleine nécessiterait la construction d'un modèle à pas de temps irrégulier. Dans ce cas, le problème aurait pu être traité de deux manières :

- 1) Discrétiser le temps horaire (en pas de temps de 10 min par exemple), interpoler les positions afin qu'elles correspondent à un temps discrétisé, puis construire un modèle avec données manquantes, toutes les positions à pas de temps 10 min n'étant pas connues.
- 2) Ou construire un modèle à temps continu.

Dans le premier cas, il a été préférable de ne pas interpoler, à cause du risque d'ajout de positions fausses, en particulier lorsque la trajectoire est sinueuse dans une zone de présence de bancs de thon. De plus, la construction d'un modèle avec données manquantes aurait induit la multiplication du nombre de paramètres : le changement de pas de temps au cours des données entraînerait un jeu de paramètres de lois de vitesses et d'angles pour chaque pas de temps considéré (pour une discrétisation en pas de 10 min, 6 jeux de paramètres se déduisant des distributions à 10 minutes). Or, les distributions des vitesses et des angles de changement de cap évoluent selon le pas de temps : les

distributions présentent notamment des modes plus marqués et moins de valeurs de vitesses moyennes, lorsque le pas de temps est plus faible (fig. 45).

Dans le second cas, la construction d'un modèle à temps continu nécessiterait la mise en œuvre d'une implémentation plus conséquente en termes de temps de calcul dû à la complexification du modèle.

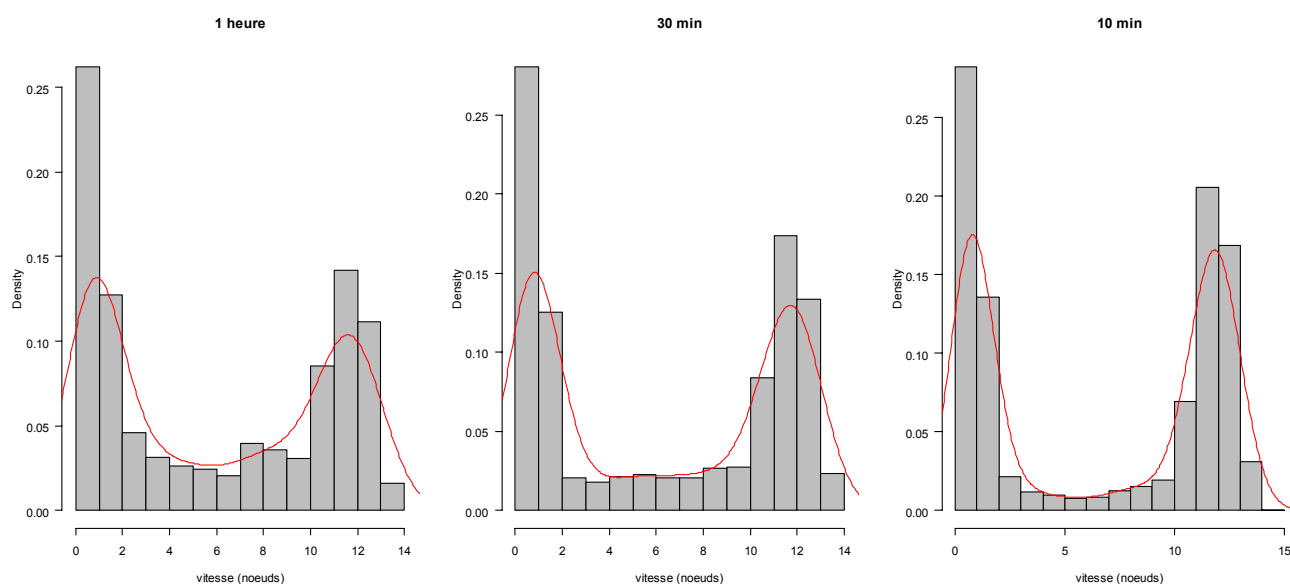


Figure 45 : Distributions des vitesses d'une trajectoire de senneur échantillonnée à pas de temps différent : une heure, 30 minutes, 10 minutes.

Le choix du type de modèle s'est donc porté sur un modèle relativement simple (pas de temps régulier), malgré la mise à l'écart d'un certain nombre de données (données non horaires). Ceci a permis de respecter l'ensemble des hypothèses sur les activités de pêche (caractère markovien, probabilités de transition).

La qualité de la donnée conditionne le choix de modèle adapté à la donnée : les données VMS collectées sur les thoniers senneurs tropicaux présentent l'avantage d'être exhaustives sur les données horaires. Une étude menée par Youen Vermard (Thèse de doctorat, 2009) sur les trajectoires VMS de chalutiers du Golfe de Gascogne montre que le modèle à espaces d'états cachés est d'autant plus difficile à appliquer lorsque les données manquantes sont nombreuses.

Des développements théoriques de statistique spatiale sont encore nécessaires pour la modélisation par un modèle continu de la trajectoire réelle comme variable latente.

Dans le cadre d'un modèle à espaces d'états markoviens cachés, les trajectoires individuelles « marquées », dont les états ont été estimés, apportent, des informations sur le comportement spatial des thoniers senneurs tropicaux de recherche des bancs de thon (chapitre 3). Mais ces trajectoires individuelles ont aussi été considérées collectivement, pour en déduire la répartition spatiale des prédateurs (flottille) et la répartition spatiale estimée des proies (thonidés) (chapitre 4). Les méthodes de géostatistique se sont révélées les plus opératoires pour utiliser un ensemble de trajectoires afin d'en déduire une estimation sur l'ensemble de la zone. Au cours de l'interpolation, les points de chaque trajectoire sont considérés de manière indépendante de leur trajectoire d'appartenance initiale. L'hypothèse (un peu forte) est donc faite que les points « marqués » sont distribués indépendamment les uns des autres. Une perspective serait d'appliquer un krigeage en tenant compte de la dépendance entre les points appartenant à chaque trajectoire, c'est-à-dire à chaque navire (en modifiant les conditions de non-biais au moment du calcul du krigeage).

Une autre perspective de ce travail serait d'interpoler le champ des « proies » (thons) à partir des sorties du modèle bayésien directement, en utilisant l'incertitude autour de l'estimation de l'état de chaque point. Pour cela, la méthode d'interpolation devrait être adaptée. De plus, si les avancées technologiques futures permettent aux positions VMS d'être calculées et transmises au moins toutes les 30 minutes, l'estimation de la durée de chaque calée deviendrait envisageable et l'ordre de grandeur des calées pourrait être pris en compte comme pondération des cartes de présence/absence de bancs de thon.

### **Discussion sur les choix sur les données**

La validation du modèle bayésien a été réalisée grâce aux données collectées par les observateurs. La comparaison entre les données issues des livres de bord et les états « pêche » du modèle reste délicate. Des difficultés ont été rencontrées lorsque les positions répertoriées ne correspondaient pas aux mêmes horaires selon les patrons, et n'étaient pas toujours en adéquation avec l'heure des calées réelles. De plus, l'heure de pêche est peu notée. Sachant cela, il est difficile de chercher à valider les heures estimées en pêche par le modèle bayésien à espaces d'états, par les livres de bord : les écarts spatio-temporels entre les calées notées et les calées réelles peuvent induire des erreurs de validation imputables aux livres de bord. De surcroît, le modèle tend à estimer deux calées successives en une seule d'une durée longue, ce qui rend la validation par calée complexe. Il a donc été jugé préférable de n'utiliser que les données collectées par les observateurs scientifiques embarqués (dont les notes sur les calées sont précises en termes de position et d'heure de début et de fin de calée) pour la validation des heures en pêche estimées.

### **Retour sur les hypothèses**

Certaines propriétés des données VMS, ainsi que certaines caractéristiques propres de la pêcherie thonière tropicale nous ont conduits à construire un modèle markovien à espaces d'états cachés basés sur les distributions de vitesses et d'angles de changement de cap.

Le modèle est basé sur des données de positions GPS de pas de temps d'une heure, car il avait été constaté que les données VMS ont été collectées à une fréquence d'acquisition minimale de 1h. De plus, les notes des observateurs embarqués ont révélé qu'une calée a une durée minimum incompressible de 1h15 (ou 1h30 selon les bateaux) et que le navire est totalement immobile pendant la calée (exceptée une légère dérive), et pendant l'encerclement du banc.

Il s'est avéré que la relation entre la durée d'une calée et le tonnage capturé n'était pas significative, nous n'avons donc pas estimé le tonnage à partir des durées de calée estimées issues du modèle. Les vitesses entre points successifs extraites des VMS ont montré un aspect markovien d'ordre 1 : le choix de l'ordre du modèle markovien sur les états s'est porté sur le premier ordre.

Les cartes d'exploration de la flottille au cours du temps ont montré que l'échantillonnage de l'ouest de l'océan indien par les thoniers senneurs évolue d'un mois à l'autre au cours de l'année. Il a donc été défini des polygones délimitant les zones d'étude, pour chaque mois des trois années 2006, 2007, 2008.

Du point de vue du comportement spatial, les données collectées par les observateurs ont montré qu'il n'existe pas de différence claire de comportement du navire de pêche entre le mouvement vers un banc libre et le mouvement vers un DCP trouvé (par hasard). Seuls peuvent être distingués les comportements vers un DCP propre et un banc libre ou DCP trouvé. Or, les observateurs ont des difficultés à noter si le DCP pêché est un DCP propre ou un DCP trouvé. A cause du manque de données a priori, il n'a donc pas été possible de détecter les calées réalisées sur banc libre et celles réalisées sur banc associé à un DCP, à partir des VMS.

### **Limites de la démarche**

La méthodologie mise en œuvre dans cette thèse a été appliquée aux thoniers senneurs français pêchant dans l'océan indien, certains paramètres du modèle bayésien ayant été estimés pour chaque navire (paramètres de transition entre les états). Il paraît tout à fait approprié d'appliquer cette méthode aux trajectoires VMS des thoniers senneurs français pêchant dans l'océan atlantique tropical, ainsi qu'aux thoniers senneurs espagnols pêchant dans l'océan indien. Bien que la flottille espagnole présente quelques différences sur le comportement de pêche, notamment concernant la stratégie de pêche sous DCP (Arrizabalaga et al., 2001), la combinaison des niveaux de probabilité de présence de thon de surface permettrait de produire des cartes à partir d'un échantillonnage plus large.

Plus généralement, le modèle à espaces d'états pourrait être développé et adapté à des trajectoires d'autres navires de pêche pêchant les mêmes espèces de thon tropical (palangriers, canneurs) dans l'océan indien, comme cela a été réalisé sur les trajectoires de chalutiers du Golfe de Gascogne (Vermard et al., accepté). L'ensemble de ces trajectoires « marquées » induirait la production de cartes reflétant l'abondance de thons en surface et en profondeur (par la pêche à la palangre), et représentant l'ensemble de la pression de pêche sur cette zone de l'océan indien tropical.

### **Discussion des résultats**

Les résultats préliminaires sur les VMS ont montré qu'avec un simple seuillage sur les vitesses, la détection des calées sur une trajectoire VMS est réalisée sur seulement 75% des calées. Le calcul d'indice de rectitude ou de variance des angles de changement de cap n'a pas permis de discriminer différentes activités de recherche sur les trajectoires VMS. C'est dans ce contexte que le choix définitif s'est porté sur un modèle markovien à espaces d'états cachés, dans un cadre bayésien.

Les résultats du modèle bayésien ont démontré que, sur l'ensemble des segments de trajectoire de pas de temps d'une heure, 10% des segments ont été mal estimés. Toutefois, la validation n'a eu lieu que sur la distinction pêche / non pêche, car les données observateurs ne sont pas assez précises pour valider les activités arrêt, recherche active, recherche-route regroupées dans « non pêche ». Ces erreurs sont en partie dues au pas de temps d'acquisition des données VMS trop long par rapport aux durées de chaque activité (les arrêts durent souvent moins d'une heure et la pêche moins de deux heures). De plus, il a été observé par les observateurs que les arrêts jouxtent souvent les calées, notamment dans les cas d'évaluation de la taille du banc, de manipulation sur un DCP, ou de repérage aux jumelles. La délimitation entre les calées et la durée des calées est donc mal estimée. Un pas de temps plus faible entre les acquisitions de positions VMS permettrait de diminuer le taux d'erreur global et d'affiner la durée des calées, en distinguant deux calées consécutives, séparées par un redémarrage du navire de courte durée. Cette distribution non aléatoire des erreurs d'estimation sur la trajectoire reste à démontrer. Ceci peut être réalisé à partir de la comparaison de la structure temporelle des activités estimée, celle des activités observées, et celle des activités observées dilatées. Cette validation complémentaire de l'activité de pêche peut être menée par une analyse variographique à une dimension.

### **Quelques recommandations**

Les données VMS sont les données les plus précises en termes de positions et d'heures enregistrées, et permettent donc de quantifier et de représenter finement au niveau spatial l'échantillonnage réalisé par la flottille de thoniers senneurs français dans l'océan indien.

Toutefois, pour améliorer la qualité de l'estimation par le modèle bayésien, quelques informations supplémentaires pourraient être collectées, lorsque les relations avec les armements thoniers le

permettent. Tout d'abord, les positions des bouées attachées aux DCP étant enregistrées et stockées par les pêcheurs, ces informations permettraient de distinguer les calées ayant eu lieu sur banc libre ou sur banc associé à un DCP. Cette distinction engendrerait la production de cartes distinctes de distribution des espèces fortement pêchées sur bancs libres (albacore et thon obèse), de l'espèce fortement pêchée sous DCP (listao). Il deviendrait possible d'estimer le nombre de calées, ainsi que leurs positions, où les rejets et prises accessoires ont une probabilité élevée d'occurrence.

Pour améliorer la détection précise du début et de la fin des calées, il pourrait être envisagé d'utiliser le profondimètre (« Scanmar ») accroché à la senne pour y ajouter un datalogger avec GPS. Cet équipement aurait l'avantage de repérer le début et la fin d'un coup de senne par l'indication de profondeur, et de le situer grâce au GPS et à l'horloge intégrés. L'évolution de la profondeur peut aussi indiquer l'état de la mer pendant la calée (turbulences ou non) et le temps de remontée de la senne à bord donne des informations sur le temps de salabardage, et donc la quantité pêchée (ou la quantité de prises accessoires nécessitant du tri). La principale difficulté résiderait dans la gestion de la batterie du profondimètre (actuellement, les marins le rechargent régulièrement, de préférence la nuit, lorsqu'il n'y a pas d'action de pêche).

### **Effort de pêche**

L'océan indien tropical est trop vaste pour que des campagnes scientifiques puissent y être menées pour l'évaluation des stocks de thon tropical. Un des moyens de quantifier et de suivre l'évolution de l'abondance est d'utiliser les données de pêche. Dans ce contexte, des indices d'abondance sont construits sur la base des séries temporelles des Captures Par Unité d'Effort (CPUE). Le calcul de cette abondance relative a pour but de représenter les variations relatives de l'abondance, et non les valeurs absolues de l'abondance.

L'utilisation de l'effort de pêche dans le calcul de CPUE (Capture Par Unité d'Effort) comme indice d'abondance est souvent remis en question à cause de la non proportionnalité entre les CPUE et l'abondance réelle, expliquée notamment par des phénomènes d'hyperdéplétion ou d'hyperstabilité (Hilborn and Walters 1992, Harley et al, 2001, Polacheck, 2006), d'accroissement des puissances de pêche (Fonteneau et al., 1999), ou de changement de zone de pêche (Walters, 2003). Ces critiques restent valables du point de vue général, mais des améliorations de la définition de l'effort de pêche individuel, et particulièrement la distinction entre les périodes de recherche et celles sans recherche de bancs ne peut être obtenue seulement par les activités de pêche à fine échelle spatio-temporelle.

Les données de trajectoire fournies par les VMS apportent l'information d'échantillonnage à une faible résolution spatio-temporelle. Après estimation des activités par le modèle, les positions VMS « marquées » permettent d'affiner la définition actuelle de l'effort de pêche : le temps de recherche peut être discriminé en temps en recherche active (« tracking ») et temps en recherche-route (« cruising »).

Pour contourner le problème de non proportionnalité des CPUE avec l'abondance pour lequel nous ne disposons d'aucun référentiel de l'abondance réelle, nous proposons dans cette thèse, la cartographie d'un proxy de présence de thon à fine échelle, pour l'échantillonnage de la zone par la flottille française. L'estimation globale sur un bloc de l'espace de chaque niveau de probabilité de présence peut être suivie dans le temps, et servir de référence quant à l'évolution de la répartition spatiale des thonidés tropicaux.

Une méthode dérivée du calcul de CPUE, la Capture Par Unité d'Aire (CPUA) (Arab et al. 2008, Davies et al. 2005, Halls et al., 2006) pourrait être appliquée à la pêcherie de thoniers senneurs, en bénéficiant de la précision et de la fréquence des données VMS. Fonteneau et al. (1999) proposent de suivre le ratio « nombre de cellules avec présence de thon / nombre de cellules visités ». L'évolution de ce ratio montrerait la concentration de l'effort au cours du temps. La précision des données VMS serait d'un avantage considérable sur les données de livres de bord pour ce genre de calcul reflétant les changements de stratégie de pêche.

## **Conclusions et perspectives**

Au cours de cette thèse, les données VMS de thoniers senneurs tropicaux ont été valorisées pour la première fois. Les objectifs étaient une nouvelle quantification de l'effort de pêche dans le but d'approcher l'abondance des proies (thonidés) à partir des trajectoires des prédateurs (pêcheurs). Un modèle markovien à espaces d'états cachés a été appliqué pour caractériser les trajectoires. Ce type de modèle souvent appliqué aux trajectoires d'animaux ne peut pas être validé à cause du manque de données. Dans le cas de trajectoires de pêcheurs, il nous a été possible de valider une partie des estimations grâce aux notes d'observateurs embarqués, ce qui a montré que le taux d'erreur sur les pas de temps horaires est de 10%. La cartographie de la présence/absence de bancs de thon a été mise en œuvre par l'intégration des activités identifiées sur les trajectoires des thoniers. Cette thèse a donc été l'objet d'une mise en relation des connaissances sur la théorie du mouvement pour la compréhension du comportement, avec les connaissances halieutiques. Pour répondre à la problématique de départ, les méthodes choisies se sont portées sur la statistique bayésienne et la géostatistique.

La méthodologie retenue a permis de représenter les variations d'un proxy de présence de bancs de thon. Il reste toutefois à pondérer ce proxy par les biomasses capturées pour rendre compte d'un proxy d'abondance, relatif à la pêcherie de thoniers senneurs français. Un des points forts de ce travail est la mise en évidence des zones d'absence de thons en surface, ce qui ne peut être obtenu par les autres types de données disponibles.

De nombreuses analyses restent à être menées sur les données Observateurs, telles que une étude spatialisée de l'estimation des prises accessoires et des rejets (Amande et al., 2008). Les données VMS, éventuellement couplées aux données issues des campagnes de marquage (par la Commission Thonière de l'Océan Indien) pourraient servir à terme à la définition d'habitats du thon dans l'océan indien tropical, pouvant conduire à la fermeture à la pêche de certaines zones (création d'aires marines protégées) (Murawski et al., 2005 ; Jennings, 2009).

Du point de vue halieutique, les trajectoires VMS pourront être prises en compte collectivement pour l'analyse des stratégies de pêche des flottilles de thoniers senneurs, et la mise en évidence des phénomènes de compétition et de coopération.

Pour mieux cartographier un proxy d'abondance spécifique, les biomasses capturées pourront être intégrées au calcul de cokrigage, ainsi que la distinction entre la pêche sur bancs libres (majorité d'albacores pêchés) et la pêche sur DCP (majorité de listao pêchés). Cette distinction peut être réalisée grâce à une meilleure connaissance de la distribution des DCP dans l'Océan Indien, ainsi que leurs déplacements (Fauvel et al., 2009). Pour cela, l'utilisation de données environnementales telles que les courants, les anomalies de hauteurs d'eau, la température et la salinité permettrait l'identification de « routes » des DCP et de zones de rétention. Tew Kai et al. (2009) ont analysés les liens entre l'activité tourbillonnaire et les trajectoires de Frégates dans la zone du canal du Mozambique, et mettent en évidence le type de structures méso-échelles visés par ces oiseaux marins. Un travail similaire de mise en relation des trajectoires interprétées des senneurs et de l'activité méso-échelle de la zone équatoriale au nord du canal du Mozambique a été commencé en collaboration avec Emilie Tew Kai. L'analyse conjointe de ces données environnementales, de trajectoires de DCP et des déplacements des pêcheurs de nuit rendrait envisageable la représentation spatiale de l'abondance pour les espèces de thon exploité par les thoniers senneurs.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Adams, C. F., Harris, B. P., and Stokesbury, K. D. E. 2008. Geostatistical comparison of two independent video surveys of sea scallop abundance in the Elephant Trunk Closed Area, USA. *ICES Journal of Marine Science*, 65: 995–1003.
- Amande J.M., Chassot E., Chavance P. & R. Pianet, 2008. Silky shark (*Carcharhinus falciformis*) bycatch in the French tuna purse seine fishery of the Indian Ocean. IOTC 2008-WPEB-16, 21 pages.
- Arab A., Wildhaber M.L., Wikle C.K., and Gentry C.N. 2008. Zero-Inflated Modeling of Fish Catch per Unit Area Resulting from Multiple Gears: Application to Channel Catfish and Shovelnose Sturgeon in the Missouri River. *North American Journal of Fisheries Management* 28:1044–1058.
- Arrizabalaga, H., Ariz, J., Mina, X., Delgado de Molina, A. , Artetxe, I., Pallares, P. and Iriondo, A. 2001. Analysis of the activities of purse seine supply vessels in the Indian Ocean from observers data. Doc. IOTC, WPTT-01-11, 30p.
- Bard F-X., Bach P., Josse E. 1998. Habitat, écophysiologie des thons : quoi de neuf depuis 15 ans ? In : ICCAT Tuna Symposium, ICCAT Coll. Vol. Sci. Pap., L(1): 319-342.
- Bertrand, S., Burgos, J., Gerlotto, F., Atiquipa, J., 2005. Lévy trajectories of Peruvian purse-seiners as an indicator of the spatial distribution of anchovy (*Engraulis ringens*). *ICES J. Mar. Sci.* 62, 447–482.
- Beverton, R. J. H. and Holt, S. J. 1957. On the Dynamics of Exploited Fish Populations, Fishery Investigations Series II Volume XIX, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food.
- Bez, N. 2002. Global fish abundance estimation from regular sampling: the geostatistical transitive method. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 59: 1921–1931.
- Bez, N. 2007. Transitive geostatistics and statistics per individual: a relevant framework for assessing resources with diffuse limits. *Journal de la Société Française de Statistique*, tome 148, n° 1.
- Block, B. A. and Stevens, E. D. 2001. Tuna: Physiology, Ecology, and Evolution, vol. 19, Fish Physiology. San Diego: Academic Press.
- Block B.A., Teo S.L.H., Walli A., Boustany A., Stokesbury M.J.W., Farwell C.J., Weng K.C., Dewar H., Williams T.D., 2005. Electronic tagging and population structure of Atlantic bluefin tuna. *Nature*. Vol 434. April 2005.
- Boyce Daniel G., Derek P. Tittensor, Boris Worm. 2008. Effects of temperature on global patterns of tuna and billfish richness. Vol. 355: 267–276. *Mar Ecol Prog Ser*.
- Brill, R.W. 1994. A review of temperature and oxygen tolerance studies of tunas pertinent to fisheries oceanography, movement models and stock assessments. *Fisheries Oceanography*, 3 (3), 204-216.
- Buckland S.T., Newman K.B., Thomas L., Koesters N.B. 2004. State-space models for the dynamics of wild animal populations. *Ecol. Model.* 171, 157–175.



Cayré P. and Marsac F. 1993. Modelling the yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) vertical distribution using sonic tagging results and local environmental parameters. *Aquat. Living Resour.*, 1993, 6, 1-14.

Chilès, J.P., and Delfiner, P. (1999) *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, Wiley, New York.

Corbineau, A., Rouyer, T., Cazelles, B., Fromentin, J-M., Fonteneau, A. & Ménard, F. 2008. Time series analysis of tuna and swordfish catches and climate variability in the Indian Ocean (1968-2003). *Aquatic Living Resources*, 21 (3), 277-285.

Dagorn, L., Holland, K. N., Hallier, J.-P., Taquet, M., Moreno, G., Sancho, G., Itano, D., G., Aumeeruddy, R., Girard, C., Million, J. et Fonteneau, A. (2006). Deep diving behavior observed in yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Aquat. Living Resour.* 19, 85–88 (2006).

Davies P.E., L.S.J. Cook, S.A. Munksand J. Meggs. 2005. *Astacopsis gouldi* Clark: habitat characteristics and relative abundance of juveniles. *Tasforests* Vol. 16 December 2005.

Doumenge, F. 1998. L'Histoire de pêches thonières. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 50 (2), 753-803.

FAO, 2004. Management of tuna fishing capacity: conservation and socio-economics, 2nd meeting of the technical advisory committee of the FAO project, March 2004, Madrid, Spain.

FAO, 2007. Global fishery resources of tuna and tuna-like species. Jacek Majkowski. Fisheries Management and Conservation Service. Fisheries and Aquaculture Management Division. FAO Fisheries and Aquaculture Department. Food and Agriculture organization of the United Nations. Rome, 2007. FAO Fisheries technical paper.

Faraj, Abdelmalek. 2009. Techniques géostatistiques au service de l'aménagement de la pêche céphalopodière marocaine. Doctorat Géostatistique, CG- Centre de Géosciences, ENSMP p.209.

Faraj A. & N. Bez, 2007. Spatial considerations for the Dakhla stock of *Octopus vulgaris*: indicators, patterns and fisheries interactions. *ICES J. Mar. Sci.*, 64, 1820-1828.

Fauchald, P., Tveraa, T., 2003. Using first-passage time in the analysis of area-restricted search and habitat selection. *Ecology* 84, 282–288.

Fauvel T., Bez N., Walker E., Delgado A., Murua H., Chavance P., Dagorn L. 2009. Comparative study of the distribution of natural versus artificial drifting Fish Aggregating Devices (FADs) in the Western Indian Ocean. *CTOI*. 2009.

Fonteneau A., Vincent Lucas, Emilie Tewkai, Alicia Delgado and Hervé Demarcq. 2008. Mesoscale exploitation of a major tuna concentration in the Indian Ocean. *Alain Fonteneau*, 1. *Aquat. Living Resour.* 21, 109–121.

Fonteneau A, Pallares P, Pianet R (2000a) A worldwide review of purse seine fisheries on FADs. In: Le Gall JY, Cayré P, Taquet M (eds) *Pêche thonière et dispositifs de concentration de poissons*. Actes Colloques IFREMER 28:15–35.

- Fonteneau A., Gaertner D., Nordstrom V. 1999. ICCAT. An overview of problems in the catch per unit of effort and abundance relationship for the tropical purse seine fisheries. ICCAT.
- Fonteneau A. 1992. Pêche thonière et objets flottants : situation mondiale et perspective. Réunion Action incitative Comportement Agrégatif. Orstom Montpellier. juin 1992 Stretta J.M. Ed. Sci Document Interne Centre Orstom Montpellier : 33-60.
- Foucou M. 2004. Pêche et gens de mer dans la rade de Fréjus St-Raphaël. Eds les Voiles Latines de Saint-Aygulf, Fréjus.
- Fréon P. and Dagorn L., 2000. Déterminisme du comportement associatif des poissons pélagiques : les hypothèses à l'épreuve des faits. In : Pêche thonière et dispositifs de concentration de poissons. Le Gall J.-Y., Cayré P., Taquet M. (eds) Ed. Ifremer, Actes Colloq., 28, 483-491.
- Gaertner D., Pagavino, M., Marcano, J., 1999. Influence of fishers' behaviour on the catchability of surface tuna schools in the Venezuelan purse-seiner fishery in the Caribbean Sea. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56, 394-406.
- Gascuel D. 1993. Premier Forum Halieumétrique, Rennes, 29/06 au 04/07/1993. Session 2 : Relations Efforts, Mortalité, Captures. Efforts et puissances de pêche : redéfinition des concepts et exemple d'application.
- Gaspar P., Georges J-Y., Fossette S., Lenoble A., Ferraroli S., Le Maho Y. 2006. Marine animal behaviour: neglecting ocean currents can lead us up the wrong track. *Proc. R. Soc. B*, 273, 2697–2702.
- Gelman A., Carlin J.B., Stern H.S., Rubin D.B. 2004. Bayesian Data Analysis. Chapman & Hall/CRC, Second Edition, 698 pp.
- Gillis D.M. and Peterman R.M. 1998. Implications of interference among fishing vessels and the ideal free distribution to the interpretation of CPUE. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55: 37–46.
- Green, R.E. 1967. Relationship of the thermocline to success of purse seine for tuna. *Trans. Am. Fish. Soc.* 96: 126-130
- Gurarie E., Andrews R.D., Laidre K.L. 2009. A novel method for identifying behavioural changes in animal movement data. *Ecology Letters*, 12: 395–408.
- Hallier J.-P., and Gaertner D. 2008. Drifting fish aggregation devices could act as an ecological trap for tropical tuna species. Vol. 353: 255–264, 2008. *Mar Ecol Prog Ser*.
- Halls et al., 2006. The relationship between multi-species catch and effort: Among fishery comparisons. A.S. Halls a, , R.L. Welcomme, R.W. Burn c . *Fisheries Research* 77 (2006) 78–83
- Harley S.J., Myers R.A., Dunn A. 2001. Is catch-per-unit-effort proportional to abundance? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 58: 1760–1772.
- Hilborn, R. and C. J. Walters. 1992. Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty. Chapman and Hall, New York. 570 p.

IOTC-2008-WPTT-R[E] Report of the Tenth Session of the IOTC. Working Party on Tropical Tunas. Bangkok, Thailand 23-31 October, 2008.

IOTC-2008-WPTT-06. Pianet R., Bretaudeau P., Hervé A. 2006. French purse-seine tuna fisheries statistics in the Indian Ocean, 1981-2007. CTOI. 2008.

IOTC-2009-WPTT-10. Adam Langley, Miguel Herrera, Jean-Pierre Hallier and Julien Million. Stock assessment of yellowfin tuna in the Indian Ocean using MULTIFAN-CL. 8 October 2009.

IOTC-2009-WPTT-12. Miguel Herrera, Lucia Pierre. Estimation of Catch-at-Size, Catch-at-Age and Total Catch per Area for tropical tuna species.

IOTC-2009-WPTT-21. Fonteneau Alain and Patrice Dewals. On the need to know the sex of the large yellowfin tagged when they are recovered by fisheries.

IOTC-2009-WPTT-28. J. Dorizo, V. Lucas, C. Assan, and A. Fonteneau. Preliminary analysis of fishing activities of Purse Seiners fishing in the Western Indian Ocean over the period January to June 2009.

Jammalamadaka, S.R., SenGupta, A., 2001. Topics in Circular Statistics. World Scientific, River Edge, N.J.

Jennings, S. 2009. The role of marine protected areas in environmental management. – ICES Journal of Marine Science, 66: 16–21.

Jonsen, I.D., Flemming, J.M., Myers, R.A., 2005. Robust state-space modelling of animal movement data. Ecology 86, 2874–2880.

Jonsen I.D., Myers R.A., James M.C. 2006. Robust hierarchical state-space models reveal diel variation in travel rates of migrating leatherback turtles. Journal of Animal Ecology, 75, 1046–1057.

Kulka D.W., L. Hendrickson, N. Bez, R. Schlitzer, G.A.P. Black and M.R. Simpson, 2005. Workshop on Mapping and Geostatistical Methods for Fisheries Stock Assessment. NAFO Sci. Coun. Studies, 39, 43 p.

Laurec A. and Le Guen, J.C. 1981. Dynamiques des populations marines exploitées. Tome 1, Concepts et modèles.

Lembo G., Silecchia T., Carbonara P., Contegiacomo M., Spedicato M.T. 2000. Localization of Nursery Areas of *Parapenaeus longirostris* (Lucas, 1846) in the Central- Southern Tyrrhenian Sea. Crustaceana, Vol. 73, No. 1, pp. 39-51.

Marsac F. 1992. Étude des relations entre l'hydroclimat et la pêche thonière hauturière tropicale dans l'océan indien occidental. Thèse dr. Univ. Bretagne Occidentale, Brest, 350 p.

Matheron G., 1973b, Le krigeage disjonctif, rapport N-360, Fontainebleau: Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, 40 p.

Matheron G., 1976, A simple substitute for conditional expectation: the disjunctive kriging, in: M. Guarascio, M. David and Ch. J. Huijbregts (Eds.), *Advanced geostatistics in the mining industry*, Dordrecht: NATO ASI Series C-24, Reidel & Co., pp. 221-236.

Maunder M.N., Sibert J.R., Fonteneau A., Hampton J., Kleiber P., Harley S.J. 2006. Interpreting catch per unit effort data to assess the status of individual stocks and communities. *ICES Journal of Marine Science*, 63: 1373-1385.

Ménard F., Marsac F., Bellier E., Cazelles B. 2007. Climatic oscillations and tuna catch rates in the Indian Ocean: a wavelet approach to time series analysis. *Fisheries Oceanography*, 16(1), 95-104.

Mills, C.M., Townsend, S.E., Jennings, S., Eastwood, P., Houghton, C.A., 2007. Estimating high resolution trawl fishing effort from satellite-based vessel monitoring system data. *ICES J. Mar. Sci.* 64, 248–255.

Morales, J.M., Haydon, D.T., Frair, J., Holsinger, K.E., Fryxell, J.M., 2004. Extracting more out of relocation data: building movement models as mixtures of random walks. *Ecology* 85, 2436–2445.

Morfin M., Etienne M.-P., Ménard F. 2009 ; Modèle hiérarchique bayésien pour analyser les contenus stomacaux de prédateurs marins : application aux thons tropicaux. Dans : 41èmes Journées de Statistique, SFdS, Bordeaux.

Murawski, S.A., Wigley, S.E., Fogarty, M.J., Rago, P.J., Mountain, D.G. 2005. Effort distribution and catch patterns adjacent to temperate MPAs. *ICES journal of marine science* 62, 1150-1167.

Ortega-García S. 1996. Interaction between Mexican longline and purse seine fisheries for yellowfin tuna in the eastern Pacific Ocean. Status of Interactions of Pacific Tuna Fisheries in 1995. Proceeding of the Second FAO Expert Consultation on Interactions of Pacific Tuna. Fisheries Shimizu, Japan 23 to 31 January 1995. Richard S. Shomura, Jacek Majkowski, Robert F. Harman, Series title: FAO Fisheries Technical Paper - T365. 612 p.

Parent, E. et Bernier, J. (2007) *Le raisonnement bayésien. Modélisation et inférence. Statistiques et Probabilités appliquées*, Springer.

Patterson T.A., Thomas L., Wilcox C., Ovaskainen O., Matthiopoulos J. 2008. State-space models of individual animal movement. *Trends in ecology & evolution*, 23, 2, 87-94.

Petitgas P. 1993. Use of a disjunctive kriging to model areas of high pelagic fish density in acoustic fisheries surveys. *Aquat. Living Resour.*, 1993, 6, 201-209.

Petitgas, Pierre; Josse, Erwan; Doray, Mathieu. 2008. A geostatistical method for assessing biomass of tuna aggregations around moored fish aggregating devices with star acoustic surveys. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Volume 65, Number 6, 1 June 2008 , pp. 1193-1205(13).

Petitgas P. 2001. Geostatistics in fisheries survey design and stock assessment: models, variances and applications. *Fish and Fisheries* 2(3): 231-249(19).

Poinsard F. et Le Guen J.-C. 1975. Observations sur la définition d'une unité d'effort de pêche applicable à la pêcherie de thon de l'Atlantique tropical africain. Rapports et Procès-Verbaux du Conseil International pour l'Exploration de la Mer, 1975, (168), p. 39-43.

Polacheck T. 2006. Tuna longline catch rates in the Indian Ocean: did industrial fishing result in a 90% rapid decline in the abundance of large predatory species? *Marine Policy*, 30: 470-482.

Potier M., Marsac F., Lucas V., Sabatie R., Hallier J.-P., Ménard F., 2004. Feeding partitioning among tunas taken insurface and mid-water layers : the case of yellowfin (*Tunnus alabacares*) and bigeye (*Thunnus obesus*) in the western tropical Indian Ocean. *Western Indian Ocean J. Mar.Sci.* (3) 1, 51-62  
*Western Indian Ocean J. Mar. Sci.* Vol. 3, No. 1, pp. 51–62, 2004 WIOMSA.

Ravier, C. and Fromentin, J.-M. 2004. Are the long-term fluctuations in Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) population related to environmental changes? *Fisheries Oceanography* 13, 145-160.

Renard D. and Bez N., 2008. RGeoS: Geostatistical package.

Rivoirard J., 1994. Introduction to disjunctive kriging and nonlinear geostatistics. Oxford, Clarendon Press. 181 p.

Rivoirard, J., Simmonds, E., Foote, K., Fernandes, P., Bez, N. (2000) Geostatistics for Estimating Fish Abundance. Blackwell Science Ltd, Oxford, 206 pp.

Roger C. 1994. The plankton of the tropical western Indian ocean as a biomass indirectly supporting surface tunas (yellowfin, *Thunnus albacares* and skipjack, *Katsuwonus pelamis*). *Environmental Biology of Fishes* 39: 161-172.

Royer F., Fromentin J.M., Gaspar P. 2005. A state-space model to derive bluefin tuna movement and habitat from archival tags. *Oikos* 109, 473–484.

Rufino M.M., Maynou F., Abelló P., Yule A.B. 2004. Small-scale non-linear geostatistical analysis of *Liocarcinus depurator* (Crustacea: *Brachyura*) abundance and size structure in a western Mediterranean population. *Mar Ecol Prog Ser* Vol. 276: 223–235.

Sabarros, P., Ménard, F., Lévénez, J., Tew-Kai, E. et Ternon, J. 2008. Mesoscale eddies in\_ uence distribution and aggregation patterns of micronekton in the mozambique channel. Submitted to *Marine Ecology Progress Series*.

Schouten, M.W, a. d. R. W., van Leeuwena, P. et Ridderinkhof, H. 2003. Eddies and variability in the mozambique channel. *Deep-Sea Research II*, 50:1987.

Soria M., Dagorn L., Potin G., Fréon P. 2009. First field-based experiment supporting the meeting point hypothesis for schooling in pelagic fish. *Animal behaviour* 2009, vol. 78 (6), pp. 1441-1446.

Soto M., Pallarés P., Delgado de Molina A., Gaertner D. 2008. Standardized CPUE for juveniles yellowfin, skipjack and bigeye tuna from the European purse Seine fleet in the Atlantic ocean from 1991 to 2006. ICCAT Sci. Doc. SCRS/2008/116.

Spiegelhalter, A. et al. (2007) OpenBUGS User Manual Version 3.0.2. MRC Biostatistics Unit, Cambridge.

Stequert, B. et Marsac, F. (1989). Tropical tuna surface fisheries in the Indian ocean. 282, 237 pp. Rapport technique, Fisheries Technical Paper FAO.

Taquet M. 2004. Le comportement agrégatif de la dorade coryphène (*Coryphaena hippurus*) autour des objets flottants. Thèse de doctorat, Université Paris 6.

Tew Kai E., Rossi V., Sudre J., Weimerskirch H., Lopez C., Hernandez-Garcia E., Marsac F., Garçon V. 2009. Top marine predators track Lagrangian coherent structures.. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 106, 20, 8245-50.

Turchin, P., 1998. Quantitative analysis of movement. Measuring and Modeling Population Redistribution in Animals and Plants. Sinauer Associates, Inc. 396 pp.

Tomczak, M. et Godfrey, J. S. (1994). Regional Oceanography : an Introduction. Pergamon.

Vermard Y., Rivot E., Mahévas S., Marchal P., Gascuel D. Identifying fishing trip behavior and estimating fishing effort from VMS data using Bayesian Hidden Markov Models. Ecological modelling (accepted)

Vermard Y., 2009. Évaluation bio-économique de différentes stratégies de gestion des pêches maritimes : l'exemple de la pêche pélagique du Golfe de Gascogne. Thèse de Doctorat Halieutique, Agrocampus Ouest.

Walker E., Monestiez P., Renard D., Bez N. 2008. Kriging of the latent probability of a binomial variable: application to fish statistics. International conference of geostatistics, Geostats 2008, Santiago, Chile.

Walters C. 2003. Folly and fantasy in the analysis of spatial catch rate data. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 60 : 1433-1436.

Webster R. and Oliver, M.A. 2001. Geostatistics for Environmental Scientists, John Wiley and Sons, Chichester.

Weimerskirch, H., Le Corre, M., Jacquemet, S., Potier, M., Marsac, F. 2004. Foraging strategy of a top predator in tropical waters: great frigatebirds in the Mozambique Channel. Marine Ecology Progress Series 275, 297-308.

Witt, M.J., Godley, B.J., 2007. A Step Towards Seascape Scale Conservation: Using Vessel Monitoring Systems (VMS) to Map Fishing Activity. PLoS ONE 2, 10.

Woillez M., 2007, Contributions géostatistiques à la biologie halieutique. Thèse de doctorat. Géostatistique, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Woillez M., Poulard J.C., Rivoirard J., Petitgas P., Bez N. 2007. Indices for capturing spatial patterns and their evolution in time, with application to European hake (*Merluccius merluccius*) in the Bay of Biscay. ICES J. Mar. Sci. 64, 537–550.

Zainuddin M, Saitoh K, Saitoh S (2008) Albacore (*Thunnus alalunga*) fishing ground in relation to oceanographic conditions in the western North Pacific Ocean using remotely sensed satellite data. Fish Oceanogr 17:61–73

Zainuddin, M., Kiyofuji, H., Saitoh, K. & Saitoh, S.I. 2006. Using multisensor satellite remote sensing and catch data to detect ocean hot spots for albacore (*Thunnus alalunga*) in the northwestern North Pacific. Deep-Sea Research Part, II, 419–431.

Zhu G., Xu L., Zhou Y., and Song L. 2008. Reproductive Biology of Yellowfin Tuna *T. albacares* in the West-Central Indian Ocean. J. Ocean Univ. Chin. (Oceanic and Coastal Sea Research) Vol.7, No.3, pp.327-332.

### Bibliography (Paper chapter 3)

- Bailey, H., Shillinger, G., Palacios, D., Bograd, S., Spotila, J., Paladino, F., Block, B., 2008. Identifying and comparing phases of movement by leatherback turtles using state-space models. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 356, 128–135.
- Bartumeus, F., Catalan, J., Viswanathan, G.M., Raposo, E.P., da Luz, M.G.E., 2008. The influence of turning angles on the success of non-orientated animal searches. *J. Theor. Biol.* 252, 43–55.
- Bertrand, S., Burgos, J., Gerlotto, F., Atiquipa, J., 2005. Lévy trajectories of Peruvian purse-seiners as an indicator of the spatial distribution of anchovy (*Engraulis ringens*). *ICES J. Mar. Sci.* 62, 447–482.
- Bertrand, S., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Gerlotto, F., 2007. Scale-invariant movements of fishermen: the same foraging strategy as natural predators. *Ecol. Appl.* 17, 2, 331–337.
- Bertrand, S., Díaz, E., Lengaigne, M., 2008. Patterns in the spatial distribution of Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) revealed by spatially explicit fishing data. *Prog. Oceanogr.*, 79, 379–389.
- Bovet, P., Benhamou, S., 1988. Spatial analysis of animals' movements using a correlated random walk model. *J. Theor. Biol.* 131, 419–433.
- Brooks, S.P., Gelman, A., 1998. General methods for monitoring convergence of iterative simulations. *J. Comput. Graphi. Stat.*, 7, 434–455.
- Buckland, S.T., Newman, K.B., Thomas, L., Koesters, N.B., 2004. State-space models for the dynamics of wild animal populations. *Ecol. Model.* 171, 157–175.
- Clayton, D.G., Kaldor, J.M., 1987. Empirical Bayes Estimates of Age-Standardized Relative Risks for Use in Disease Mapping. *Biometrics*, 43, 671–681.
- Deng, R., Dichmont, C., Milton, D., Haywood, M., Vance, D., Hall, N., Die, D., 2005. Can vessel monitoring system data also be used to study trawling intensity and population depletion? The example of Australia's northern prawn fishery. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 62, 611–622.
- Fauchald, P., Tveraa, T., 2003. Using first-passage time in the analysis of area-restricted search and habitat selection. *Ecology* 84, 282–288.
- Gaertner D., Pagavino, M., Marciano, J., 1999. Influence of fishers' behaviour on the catchability of surface tuna schools in the Venezuelan purse-seiner fishery in the Caribbean Sea. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56, 394–406.
- Gaertner, D., Dreyfus-Leon, M., 2004. Analysis of non-linear relationships between catch per unit effort and abundance in a tuna purse seine fishery simulated with artificial neural networks. *ICES J. Mar. Sci.* 61, 812–820.
- Gelman, A., and Rubin, D.B., 1992. Inference from iterative simulation using multiple sequences. *Statistical Science* 7, 457–511.



- Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., Rubin, D.B., 2004. Bayesian Data Analysis. Chapman & Hall/CRC, Second Edition, 698 pp.
- Grémillet, D., Kuntz, G., Delbart, F., Mellet, M., Kato, A., Robin, J.P., Chaillon, P.E., Gendner, J.P., Lorentsen S.H., Le Maho, Y., 2004. Linking the foraging performance of a marine predator with local prey abundance. *Funct. Ecol.* 18, 793-801.
- Gimenez, O., Rossi, V., Choqueta, R., Dehais, C., Doris, B., Varella, H., Vila, J-P., Pradel, R., 2007. State-space modelling of data on marked individuals. *Ecol. Model.* 206, 431–438.
- Gutenkunst, R., Newlands, N., Lutcavage, M., Edelstein-Keshet, L., 2007. Inferring resource distributions from Atlantic bluefin tuna movements: An analysis based on net displacement and length of track. *J. Theor. Biol.* 245, 243–257.
- Jammalamadaka, S.R., SenGupta, A., 2001. Topics in Circular Statistics. World Scientific, River Edge, N.J.
- Jonsen, I.D., Flemming, J.M., Myers, R.A., 2005. Robust state-space modelling of animal movement data. *Ecology* 86, 2874–2880.
- Jonsen, I.D., Myers, R.A., James, M.C., 2007. Identifying leatherback turtle foraging behaviour from satellite telemetry using a switching state-space model. *Mar Ecol Prog Ser* 337, 255–264.
- Knoppien, P., Reddingius, J., 1985. Predators with two modes of searching: a mathematical model. *J. Theor. Biol.* 114, 273-301.
- Mandelbrot, B. B., 1977. Fractals, Form, Chance and Dimension. W. H. Freeman and Co., San Francisco, 365 pp.
- Mardia, K.V., Jupp, P., 2000. Directional Statistics (2nd edition), John Wiley and Sons Ltd.
- Mills, C.M., Townsend, S.E., Jennings, S., Eastwood, P., Houghton, C.A., 2007. Estimating high resolution trawl fishing effort from satellite-based vessel monitoring system data. *ICES J. Mar. Sci.* 64, 248–255.
- Morales, J.M., Haydon, D.T., Frair, J., Holsinger, K.E., Fryxell, J.M., 2004. Extracting more out of relocation data: building movement models as mixtures of random walks. *Ecology* 85, 2436–2445.
- Ovaskainen, O., Hanski, I., 2001. Spatially structured metapopulation models: global and local assessment of metapopulation capacity. *Theor. Popul. Biol.* 60, 281-304.
- Ovaskainen, O., 2004. Habitat-Specific Movement Parameters Estimated Using Mark-Recapture Data and a Diffusion Model. *Ecology*, 85(1), 242-257.
- Patterson, T.A., Thomas, L., Wilcox, C., Ovaskainen, O., Matthiopoulos, J., 2008. State-space models of individual animal movement. *Trends Ecol. Evol.*, 23, 2, 87-94.

Piet, G.J., Quirijns, F.J., 2009. The importance of scale for fishing impact estimations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 66, 829–835.

R Development Core Team, 2004. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 3-900051-00-3. <http://www.R-project.org>.

Rijnsdorp, A.D., Piet, G.J., Poos, J.J., 2001. Effort allocation of the Dutch beam trawl fleet in response to a temporarily closed area in the North Sea. ICES, Copenhagen (Denmark). CM 2001/N:01.

Robinson, P.W., Tremblay, Y., Crocker, D.E., Kappes, M.A., Kuhn, C.E., Shaffer, S.A., Simmons, S.E., Costa D.P., 2007. A comparison of indirect measures of feeding behaviour based on ARGOS tracking data. *Deep-Sea Res. Part II* 54: 356–368.

Royer, F., Fromentin J.M., Gaspar P., 2005. A state-space model to derive bluefin tuna movement and habitat from archival tags. *Oikos* 109, 473–484.

Sims, D.W., Witt, M.J., Richardson, A.J., Southall, E.J., & Metcalfe, J.D., 2006. Encounter success of free-ranging marine predator movements across a dynamic prey landscape. *Proc R Soc B.*, 273, 1195-1201.

Strenio, J.F., Weisberg, H.I., Bryk, A.S., 1983. Empirical Bayes estimation of individual growth-curve parameters and their relationship to covariates. *Biometrics.* 39, 1, 71-86.

Thomas, L., Buckland, S.T., Newman, K.B., Harwood, J., 2005. A unified framework for modelling wildlife population dynamics. *Aust. NZJ Stat.* 47(1), 19–34.

Thomas, A., O Hara, B., Ligges, U., Sturtz, S., 2006. Making BUGS Open. *R News* 6: 12-17.

Tremblay, Y., Roberts, A.J., Costa D.P., 2007. Fractal landscape method: an alternative approach to measuring area-restricted searching behavior. *J. Exp. Biol.* 210, 935–945.

Tremblay, Y., Robinson, P.W., Costa, D.P., 2009. A parsimonious approach to modeling animal movement data. *Plos One*, 4, 3.

Turchin, P., 1998. Quantitative analysis of movement. *Measuring and Modeling Population Redistribution in Animals and Plants*. Sinauer Associates, Inc. 396 pp.

Vermard, Y., Rivot, E., Mahevas, S., Marchal, P., Gascuel, D., 2009. Identifying fishing trip behaviour and estimating effort from VMS data using Bayesian Hidden Markov Models, *Ecol. Model.*, submitted.

Viswanathan, G.M., Afanasyev, V., Buldyrev, S.V., Murphy, E.J., Prince, P.A., Stanley, H. E., 1996. Lévy flight search patterns of Wandering Albatrosses. *Nature* 381:413.

Wikle, C.K., 2003. Hierarchical Bayesian models for predicting the spread of ecological processes. *Ecology* 84, 6, 1382-1394.

Witt, M.J., Godley, B.J., 2007. A Step Towards Seascape Scale Conservation: Using Vessel Monitoring Systems (VMS) to Map Fishing Activity. PLoS ONE 2, 10.

Zollner, P.A, Lima, S.L., 1999. Search Strategies for Landscape-Level Interpatch Movements. Ecology, 80(3), 1019-1030.

## **ANNEXES**

**Annexe 1 : Article publié avec comité de lecture Geostats 2008**

**Annexe 2 : Note publiée ICCAT 2009**

**Annexe 3 : Code R/BUGS**

**Annexe 4 : Atlas des cartes de VMS de thoniers senneurs français des cartes effort/pêche par pixels**

**Annexe 5 : Atlas des cartes de proxy de présence de thon**



**Annexe 1 : Article publié avec comité de lecture Geostats 2008**

# KRIGING OF THE LATENT PROBABILITY OF A BINOMIAL VARIABLE: APPLICATION TO FISH STATISTICS

EMILY WALKER <sup>(1)</sup>, PASCAL MONESTIEZ <sup>(2)</sup>, DIDIER RENARD <sup>(3)</sup> and NICOLAS BEZ <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> IRD, Avenue Jean Monnet BP 171, F-34203 Sète, France

<sup>(2)</sup> INRA, Domaine Saint Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon, France

<sup>(3)</sup> ENSMP, Centre de Géosciences, 35 rue Saint Honoré, Fontainebleau, France

## ABSTRACT

*The tropical tuna purse seine fishery is characterised by two fishing modes: one on free swimming tuna schools and one on schools associated with Fish Aggregating Devices (FAD). Our purpose is thus to understand how the two fishing modes are spatially distributed in the Indian Ocean and how this distribution has changed over the seasons and the years. Conditional on the latent probability that a set could be realized on a FAD, the number of sets on FAD was considered as independent Binomial random variables. Such a hierarchical model allows reducing the instabilities encountered when working on empirical ratios based on few observations. We discussed the connections with “kriging with measurement errors” and, the determination of the mean and the variance of the latent variable. The use of 22 years of fishing statistics (1985 – 2006) indicated a small year to year variability between variograms of the latent variable. A single model was thus used to krig the probability for fishing sets to be on log school. The time series of the kriging maps highlighted areas of systematic large probability of the second fishing mode which was consistent with expert knowledge but question the stationarity assumption made on the latent variable.*

## INTRODUCTION

In the Indian Ocean the tuna purse seine fishery is characterised by two different fishing modes. One mode is fishing on free swimming tuna schools. The second one is fishing on tuna schools associated to flotsams. As a matter of fact, floating objects aggregate small fish together with top predators, that is why scientists

called either natural or artificial drifting flotsams, Fish Aggregating Devices (FADs). For long time fishermen have found their interest to use FADs and to add buoys to the flotsams, in order to locate potential schools of tuna anytime (Hallier and Parajua, 1999).

The distinction between the two fishing modes is fundamental in a management perspective. Indeed, catches on FADs are composed of different tuna species (*Thunnus albacares* (Yellowfin tuna), *Katsuwonus pelamis* (Skipjack), and *Thunnus obesus* (Bigeye Tuna)) and by several associated species such as sharks or small pelagic fish, whereas catches realized on free swimming schools are mainly monospecific (e.g. large yellowfin tuna). (Fonteneau et al., 2000). Moreover, contrary to present practices, the definition of an effective fishing effort should be specific to each fishing mode so that the ratio of catch over fishing effort could be considered as a relevant biomass index.

The objective of this study is then to determine the probability of a fishing set to be realized on FAD and to map this probability in the fishing zone of the tuna purse seiners in the Western Indian Ocean, for temporal strata.

The true distribution of FAD (Fish Aggregating Devices) is indeed unknown (Moreno et al., 2007), and the objective is to estimate a latent variable representing the probability that a set could be realized on a free school or on a log school (FAD). We thus developed and applied a hierarchical model where fishing statistics are modelled as a binomial random function conditionally to a latent variable representing the probability to realise a set on a log school. Such an approach presents the advantage to take into account sampling heterogeneities (the total number of sets realised in a block/in a statistical square) and to reduce the numerical instabilities one faces when working directly on empirical proportions due to low number of fishing operations realized in some parts of the fishing area. Representing the ratio of fishing sets on FAD over the total number of sets by  $1^\circ$  by  $1^\circ$  statistical squares, effectively indicated that, despite a relative stability of the seasonal pattern over time (fig. 1), this ratio was unrealistically large in the borders of the fishing area where very few fishing operations were made compared to the centre of the area (fig. 2).

To represent the seasonal spatial distribution of the two fishing modes in the Indian Ocean, our objective was to krigé the latent probability for a set to be realized on FADs (not known) from a binomial variable, the ratio (known). This approach has strong similarities with that already developed by Monestiez et al. (2006), where the objective was to improve the variogram estimation by including a Poisson modelling of the observation process in a classical geostatistical approach, or with the approach developed by Oliver et al. (1993) on epidemiologic data.



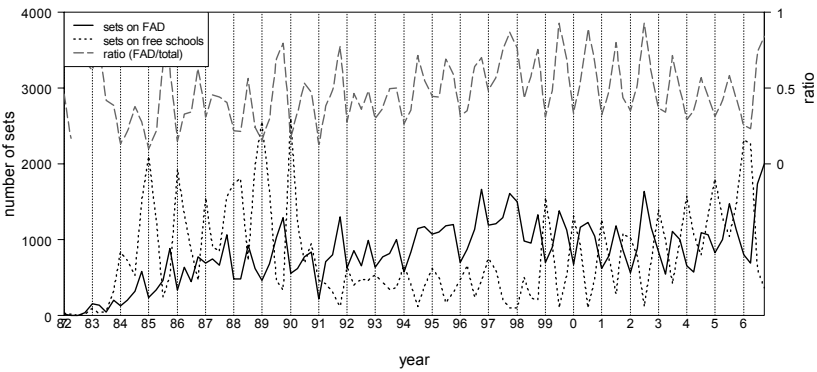


Figure 1: The time series of the number of fishing sets on FADs, the number of fishing sets on free schools, and the ratio (number of sets on FADs divided by the total number of sets), quarter by quarter from 1982 to 2006.

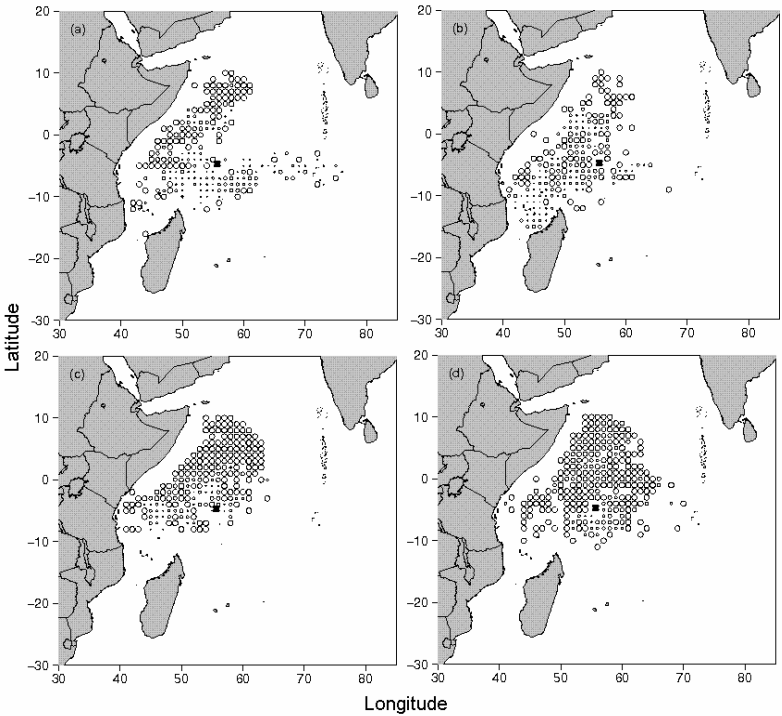


Figure 2: Ratios “number of sets on FADs divided by the total number of sets” for the four quarters in 2006 (1<sup>st</sup> quarter (a), 2<sup>nd</sup> quarter (b), 3<sup>rd</sup> quarter (c), 4<sup>th</sup> quarter (d)) in the Western Indian Ocean. For each square of 1° by 1°, the ratios are symbolised by the circles, their size depending on the value of the ratio.

## METHODOLOGY

### Data

Data correspond to the historical fishermen's fishing declarations (logbooks) of tuna purse seiners in the Indian Ocean for the period 1985-2006. These data are provided by all French and Spanish tuna purse seiners' skippers based in the Seychelles Islands, who have the duty to record daily the dates, the positions and the modes of the fishing sets realized. The two fishing modes target either (1) free swimming tuna schools, or (2) schools associated with Fish Aggregating Devices (FAD). In practice, fishing positions are not known set by set. Logbooks rather provide one mid-position per day. To account for the uncertainties of sets' location while keeping a fine enough scale, data (number of sets and number of sets on FADs) were aggregated on regular blocks of  $1^\circ$  of longitude by  $1^\circ$  of latitude in space and to any relevant number of days in time.

The fishing activity of the purse seiners in the Indian Ocean is strongly seasonal both in terms of dominant fishing mode and in terms of spatial location. This seasonality is highlighted on figure 1, with alternate dominant fishing on free schools and dominant fishing on log schools. This seasonal pattern in the dominant fishing mode is associated with shifts in the fishing grounds (Fonteneau, 1992). We thus decided to map the probability to fish on FADs quarter by quarter based on data aggregated at the same scale, i.e.  $1^\circ \times 1^\circ \times$  quarter x year.

### Model

Let the order 2 stationary random function  $P(x)$  represents the probability for a fishing set located in  $x$  to be realized on a FAD, and let us consider  $n^{tot}(x) = n^{free}(x) + n^{FAD}(x)$  the total number of fishing sets performed at that point, a regionalized variable, i.e. a deterministic variable. In a hierarchical framework, conditional to the probability  $P(x)$ ,  $N^{FAD}(x)$  are considered as independent Binomial random variables:

$$N^{FAD}(x) | P(x) \sim \text{Bin}(P(x), n^{tot}(x)) \quad (1)$$

In our case, the concept of trials and success was not accessible at a point support but rather for aggregated data. The model was thus developed for the support  $v$  representing the cell of the grid used to aggregate fisheries statistics:

$$N^{FAD}(v_\alpha) | P(v_\alpha) \sim \text{Bin}(P(v_\alpha), n^{tot}(v_\alpha)) \quad (2)$$

The entire study (variogram model selection and kriging) was realised at that support  $v$ . The random field  $P(v(x))$  was supposed to be positive honouring order 2 stationarity, with mean  $m_P$ , variance  $\sigma_P^2$  and covariance function only dependent on the distance  $h_{\alpha\beta}$  between supports  $v_\alpha$  and  $v_\beta$  :

$$C_P(v_\alpha, v_\beta) = \text{cov}(P(v_\alpha), P(v_\beta)) = C_P(h_{\alpha\beta}) \quad (3)$$

The empirical ratios  $r(v_\alpha) = r_\alpha = \frac{n^{FAD}(v_\alpha)}{n^{tot}(v_\alpha)}$  were thus considered as noisy realizations of  $P(v(x))$ . Following Monestiez et al. (2006), the conditional

independence of the observations allowed getting an estimation for the variogram of  $P(v(x))$  based on the variogram of the ratio appropriately weighted by the total numbers of trials:

$$\gamma_P^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\substack{\alpha, \beta \\ \alpha \neq \beta \\ h_{\alpha\beta} \approx h}} \left( \frac{n_{\alpha}^{tot} \cdot n_{\beta}^{tot}}{n_{\alpha}^{tot} + n_{\beta}^{tot}} \cdot (r_{\alpha} - r_{\beta})^2 - a \right) \quad (4)$$

$$\gamma_P^*(h) = \gamma^w(h) - K(h) \cdot a$$

In Eq. 4,  $N(h)$  represents the sum of the weights  $\frac{n_{\alpha}^{tot} \cdot n_{\beta}^{tot}}{n_{\alpha}^{tot} + n_{\beta}^{tot}}$  for each distance lag,

$\gamma^w(h)$  is the binomial variogram without the correction, and  $K(h)$  represents  $\frac{N_{pairs}(h)}{2 \cdot N(h)}$ . The term  $a = m_P(1 - m_P) - \sigma_P^2$  allows correcting the bias when moving from

the empirical ratios to the latent probability. As  $E[\text{var}(r_{\alpha} - r_{\beta} | P)] = a \cdot \frac{n_{\alpha}^{tot} + n_{\beta}^{tot}}{n_{\alpha}^{tot} \cdot n_{\beta}^{tot}}$ , the

parameter  $a$  is necessarily positive (inducing dependence in the estimations of parameters  $m_P$  and  $\sigma_P^2$ ) and  $0 \leq \sigma_P^2 \leq m_P \cdot (1 - m_P) < 0.25$ . An iterative procedure was used to approximate  $\sigma_P^2$ . Given an estimated value for  $m_P$ , here the mean of the ratio of all data for a given year and a given quarter, we started with  $\sigma_P^2 = 0$  and replaced the value by the sill of the experimental variogram obtained by automatic fit of the structure. This was repeated until convergence which usually happened very quickly (max. 5 iterations). However, nothing was done to constraint parameters  $m_P$  and  $\sigma_P^2$  to honour the previous relationship, ending sometimes to inconsistencies, i.e. negative values for  $a$  (14 times out of 88 cases). Finally,  $K(h) = \frac{N_{pairs}(h)}{2 \cdot N(h)}$  represents the ratio between the number of pairs of

data available at distance  $h$  and the weight for the same distance class. The numerator only depends on the geometry of the fishing grounds, i.e. the visited cells, while the denominator is homogeneous to the total number of fishing sets, i.e. quantities of visits in each cell. If the number of fishing operations was twice larger everywhere,  $K(h)$  would be divided by two.

With the objective to filter out the estimated mean of the latent probability,  $P(v_0)$  was predicted by:

$$P_0^* = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \frac{n_{\alpha}^{FAD}}{n_{\alpha}^{tot}} \quad (5)$$

with the constraint that the kriging weights sum to one. The kriging system, expressed in terms of covariance, was composed of  $n + 1$  equations where  $n$  denotes the total number of active points (either all samples in case of unique neighbourhood or samples falling in the neighbourhood centred on  $v_0$  in case of moving neighbourhood):

$$\begin{pmatrix} C_{11} + \frac{a}{n_1} & \dots & C_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & \dots & C_{nn} + \frac{a}{n_n} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{10} \\ \vdots \\ C_{n0} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

showing that the diagonal of the left part of the equation is made of the (non stationary) covariance of the ratio while the rest of the matrix, and the right part of the equation, correspond to the covariance of the latent variable. In other words, this method provides a theoretical framework to honour the very nature of count data and to filter out a measurement error specific to each data while being able to estimate the spatial structure of the unbiased signal. The kriging variance is:

$$Var(P_0^* - P_0) = \sigma_P^{2*} - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C_P(h_{\alpha 0}) + \mu. \quad (7)$$

## RESULTS AND DISCUSSION

### Results

On total 88 experimental variograms of the latent variable have been built quarter by quarter for all years between 1985 and 2006. The variograms did not show any important changes in their form, all variograms showing a sill (Fig. 3). Given that the range was large compared to the field, the year to year variability between variograms was indeed consistent with the variability one would expect amongst the variograms of several realisations. Quarterly mean variograms were also very similar in shape and level (Fig. 3) justifying the use of a unique model for all quarters and years. The model was composed of a small nugget component (sill = 0.024; i.e. 17% of total sill) and a spherical component (sill = 0.113; range = 14°). We checked that there was no directional effect and choose an isotropic model.

A moving neighbourhood was thus defined with a maximal distance radius of 15°, a minimum number of points equal to 15 and a maximum equals to 200. To be consistent with the support of the input data, the kriging grid was a regular grid of 0.5° by 0.5° squares. Its origin was however slightly shifted from the original one not to overweight the data corresponding to the kriged cell. The number of active points for kriging ranged between 15 and 200.

For the year 2006 taken as an example, the kriging maps (Fig. 4) showed patterns that were not accessible in the raw maps. These patterns are compatible with meso-scale structures observed in circulation models outputs and on satellite images (not shown in here). Kriging emphasized the zones where the probability that a fishing set is realized on FAD is higher, and enabled reducing the heterogeneities on the borders of the fishing area. Finally, the time series of the kriging maps highlighted areas of systematic large probability of the second fishing mode which was consistent with expert knowledge.

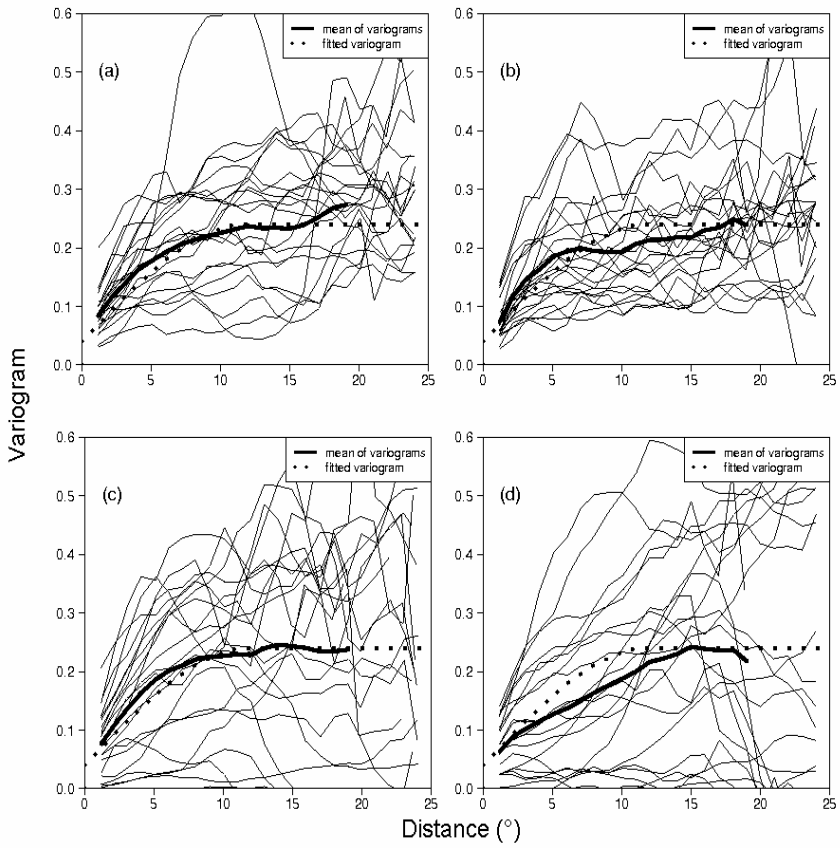


Figure 3: Experimental variograms for the first quarter (a), the second quarter (b), the third quarter (c), and the fourth quarter (d) from 1985 to 2006, with the mean of the variograms (bold) and the fitted model of variogram (dotted).

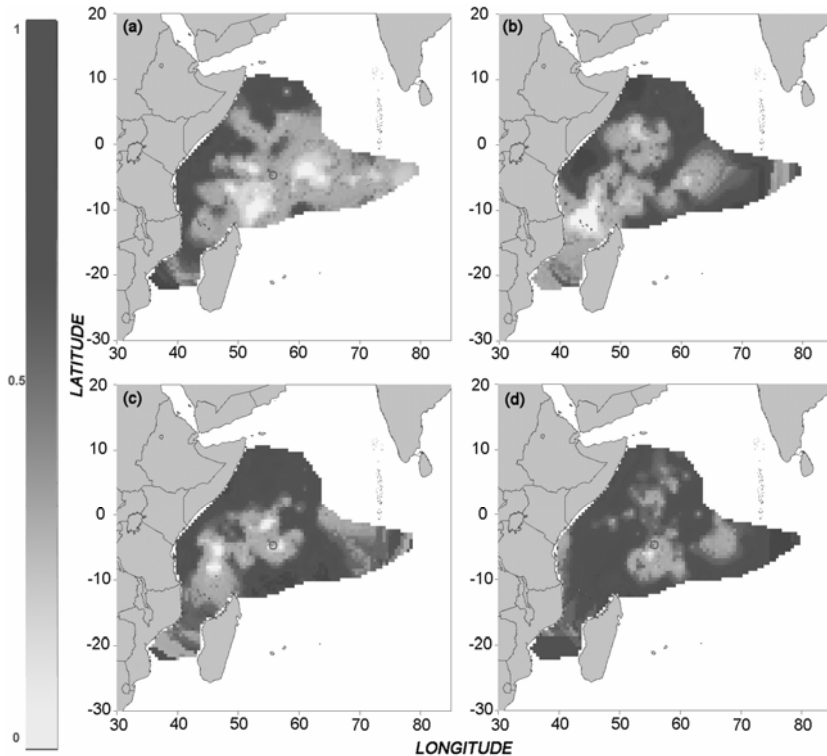


Figure 4: Kriging maps of the probability of a fishing set on FAD, examples of the four quarters (1<sup>st</sup> (a), 2<sup>nd</sup> (b), 3<sup>rd</sup> (c), 4<sup>th</sup> (d)) in 2006. The scale is from 0 to 1 which represents a high probability of realisation of a set on FAD. (The circle in the middle of the area symbolises the Seychelles Islands).

## Discussion

At first sight, the stability of the spatial structure of the latent probability was surprising given the strong seasonality of the fishery. Fishing on FADs is known to be dominant during the end of the year, end of quarter 3 beginning of quarter 4 (Fig. 1). Our results indicated that despite this fishing mode being dominant or not, the variograms' shapes remain stable. Reminding that the average level of a random function is filtered out by the variogram, this means that the probability to fish on FADs gets an intrinsic structure irrespective of its mean value.

As the ratios were assumed conditionally independent, the kriging of the latent probability is indeed close to the kriging with measurement errors (Chilès and Delfiner 1999). Actually the present framework improved the simpler latter kriging by explicitly modelling the spatial structure of the latent process. The overall robustness of this approach is thus strongly dependent on the assumptions made on the latent (unknown) variable. Amongst those, stationarity is crucial. The time series of the kriging maps (not shown for lack of space) highlighted areas of systematic large probability for fishing operation to be on FAD which was consistent with expert knowledge but question the stationarity assumption made on the latent variable. Stationarity would require these hot spots to appear

everywhere in the field rather than in a specific area. Local stationarity could have been considered but is difficult to handle. As a matter of fact, parameters  $m_P$  and  $\sigma_P^2$  are estimated by an iterative procedure based on the experimental variogram and have then a global basis. A local approach would require a local variogram which is data demanding. As mentioned above, theoretically, the variogram for  $P(x)$  is not affected by a change in  $m_P$ . However in practice, one needs to estimate the variogram of the latent probability and thus parameter  $a = m_P(1 - m_P) - \sigma_P^2$ . This is the only area where  $m_P$  is required. To avoid influencing the rest of the procedure by the estimation of  $m_P$ , we filtered out this parameter at the kriging stage.

In fact, the main change induced by Eq. 4 comes from the weighting of the increments of ratio. The use of correcting term  $K(h) \cdot a$  did only change the results marginally (Fig. 5a) indicating that the variogram model was robust with regards to the estimation of  $a$ . Looking into details indicated that the term  $K(h)$  was indeed stable from quarter to quarter (Fig. 5b).

Finally, while this framework is designed for estimating a latent probability, nothing is made indeed to constraint the result to fall in the interval  $[0; 1]$ . We thus encountered (especially in extrapolation cases) kriging values smaller than 0 or slightly larger than 1 which were cut to the authorized extremes. Similarly, no constraint insured that  $a$  was positive.

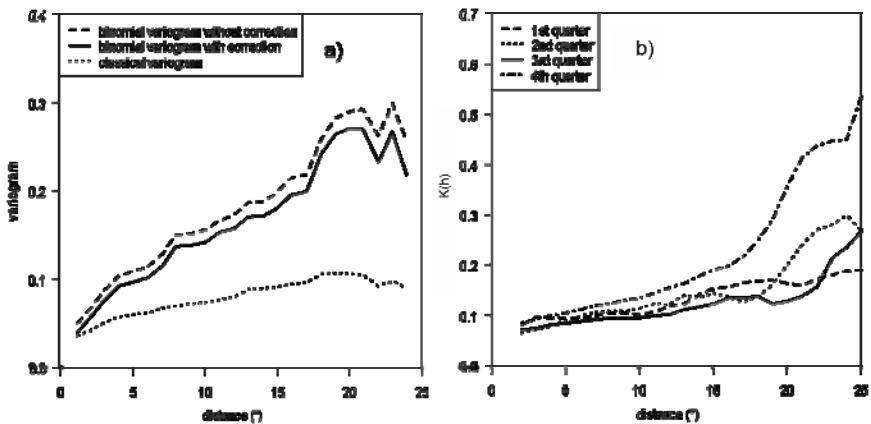


Figure 5: Variograms for the 3rd quarter in 2006 (a): the classical variogram, the variogram based on the binomial variable but without the correction term ( $a = m_P(1 - m_P) - \sigma_P^2$ ), and the variogram based on the binomial variable with the correction term. The correction term  $K(h)$  without the weighting by  $a$  (b) is represented for the four quarter of 2006. The values of  $a$  for the four quarters are successively 0.087, 0.100, 0.055 and 0.053.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Authors are very grateful to the Instituto Español de Oceanografía (IEO) which authorized the use of the Spanish data of the common French-Spanish fine scale fishing statistics tuna database. This study has been carried out with financial support from the Commission of the European Communities, specific RTD programme “Specific Support to Policies”, “sustainable management of Europe’s natural resources”. It does not necessarily reflect its views and in no way anticipates the Commission’s future policy in this area.

## REFERENCES

- Chilès, J.P. and Delfiner, P. (1999) *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, Wiley, New York.
- Fonteneau, A., Pallares, P. and Pianet, R. (2000) *A Worldwide Review of Purse Seine Fisheries on FADs*. *Revue Mondiale des Pêcheries à la Senne sous DCP* in *Pêche Thonière et Dispositifs de Concentration des Poissons*. LeGall, Cayré et Taquet Ed., Editions IFREMER, pp. 15-35.
- Fonteneau, A. (1992) *Pêche Thonière et Objets Flottants : Situation Mondiale et Perspectives*, Rec. Doc. Scient. ICCAT 40, pp. 459-472.
- Hallier, J.P. and Parajua, J.I. (1999) *Review of Tuna Fisheries on Floating Objects in the Indian Ocean*, in Scott, M.D. et al. (Ed.) (1999). *Proceedings of the International Workshop on the Ecology and Fisheries for Tunas Associated with Floating Objects* February 11-13, 1992, pp. 195-221.
- Monestiez, P., Dubroca, L., Bonnin, E., Durbec, J-P. and Guinet, C. (2006) *Geostatistical Modeling of Spatial Distribution of Balaenoptera physalus in the Northwestern Mediterranean Sea from Sparse Count Data and Heterogeneous Observation Efforts*, *Ecological Modelling* 193, pp. 615-628.
- Moreno, G., Dagorn, L., Sancho, G. and Itano, D. (2007) *Fish Behavior from Fishers' Knowledge: the Case Study of Tropical Tuna around Drifting Fish Aggregating Devices (DFADs)* *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 64, pp. 1517-1528.
- Oliver, M.A., Lajaunie, C., Webster, R., Muir K.R. and Mann, J.R. (1993) *Estimating the Risk of Childhood Cancer*, in Soares, A. (Ed.), *Geostatistics Troia'92*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 899-910.





## **Annexe 2 : Note publiée ICCAT 2009**

## FISHING ACTIVITY OF TUNA PURSE-SEINERS ESTIMATED FROM VMS DATA AND VALIDATED BY OBSERVERS' DATA

Emily Walker<sup>1,2</sup>, Daniel Gaertner<sup>1</sup>, Philippe Gaspar<sup>2</sup>, and Nicolas Bez<sup>1</sup>

### Summary

*In the lack of direct estimate of tuna abundance, the French tropical tuna fleet of purse-seiners provides a way to monitor the tuna stocks particularly through the calculation of Catch per Unit of Effort (CPUE). The objective of this study was to analyze the individual track of purse seiners with the aim to identify which part of the searching behaviour should be used to perform the fishing effort. In this context, Vessel Monitoring Systems (VMS) data are useful to analyse the different fishing activities of a purse seiner at a small scale (i.e. stop, track and cruise), generally embedded into the concept of fishing effort. A state-space model (run in a Bayesian framework) was applied to speeds and turning angles from Vessel Monitoring Systems (VMS) data, to identify the different "states" of the fishing behaviour of a purse seiner over a fishing trip. Then a threshold was fitted to distinguish the activities "fishing" and "stop" without fishing (from the "still" state), "tracking" (from "meander"), and "cruising" (from "straight"). On a subset of VMS data corresponding to observers' data, some differences of fishing efforts between fishing on free-swimming schools and schools associated with FAD (Fish Aggregating Devices) are highlighted.*

### Résumé

*Etant données les difficultés d'estimation directe de l'abondance de thon, la flottille française de thoniers senneurs tropicaux offre la possibilité de surveiller les stocks de thon, particulièrement grâce au calcul de Capture par unité d'effort (CPUE). L'objectif de cette étude était d'analyser la trajectoire individuelle des thoniers senneurs, dans le but d'identifier quelle parties du comportement de recherche doivent être utilisées dans le calcul de l'effort de pêche. Dans ce contexte, les données de Vessel Monitoring Systems (VMS) sont utiles pour analyser les différentes activités de pêche d'un thonier senneur à fine échelle (c'est-à-dire arrêt, recherche active, route-recherche), généralement inclus dans le concept d'effort de pêche. Un modèle à espace d'état (avec une approche bayésienne) a été appliqué aux vitesses et angles de changement de direction issus des données de Vessel Monitoring Systems (VMS) pour identifier les différents états du comportement de pêche d'un thonier senneur pendant une marée. Ensuite un seuil a été ajusté pour distinguer les activités de « pêche » et d'« arrêt » sans pêche (à partir de l'état « immobile »), « recherche active » (à partir de « sinueux »), et « route-recherche » (à partir de « tout droit »). Sur un sous-jeu de données VMS correspondant aux données Observateurs, certaines différences d'effort de pêche entre bancs pêchés sur Bancs Libres et ceux pêchés sur bancs associés aux DCP (Dispositifs de Concentration de Poisson) sont mises en évidence.*

### Keywords

*Catch/effort, CPUE, Fishing Behaviour, Purse seining, Fishing effort, logbooks, Tropical tuna species, Bayesian model, Trajectories analysis, VMS data.*

<sup>1</sup> IRD, Centre de Recherche Halieutique Méditerranéenne et Tropicale, Avenue Jean Monnet, BP 171, 34203 Sète, France.  
[Emily.Walker@ird.fr](mailto:Emily.Walker@ird.fr)

<sup>2</sup> CLS, Parc technologique du Canal, rue Hermès, 31520 Ramonville St-Agne, France.

## 1. Introduction

In the lack of direct estimates from fishery-independent sources, such as scientific surveys, catch per unit of effort (CPUE) of European tuna purse-seiners operating in the Indian Ocean and in the Atlantic Ocean (mainly from Spain and France), is used as one of the major index of abundance in tuna stock assessments. Up to now, the nominal fishing effort used to perform CPUEs is expressed as the time spent to search for tuna schools, i.e. the daylight time after omitting inactive time (i.e., setting, running from port to fishing areas, etc). Nominal fishing effort is then standardized accounting for different factors, such as the characteristics of the vessel, the season and the fishing area (Soto et al., 2008).

Even if standardised CPUEs are useful to follow the demographic trends of exploited populations, the use of directly observed CPUE as an index of abundance remains problematic and alternate indices remain looked for. In the case of the tuna purse seine fishery for which the detection of schools depends upon visual clues, the individual searching path of a vessel may be used to determine which proportions of the fishing day are effective in terms of fishing effort (Polacheck, 1988). Since 2000 the EC tuna purse-seiners are equipped by Vessel Monitoring Systems (VMS). Thanks to a general agreement with French tuna owner companies and the French Administration of Fisheries, French tropical purse-seiners' VMS data are available for scientific research, since VMS data provide accurate information on the hourly positions of the vessels.

The general purpose of this study is to benefit from VMS data to improve the definition and estimation of fishing effort, and to generate new proxies for the tuna abundance. However, VMS data depict the individual trajectory of a vessel without giving information about their fishing activities (**Figure 1**). We selected four activities, namely fishing, stopping, tracking (active searching), and cruising (searching without appearances of tuna) and estimated the time spent in each of them using a Bayesian Markovian model based on the speeds and turning angles provided by hourly VMS data. Although, the problematic is the same for the purse seine fishery operating in the Atlantic Ocean, for convenience reasons, only VMS and observers' data from the Indian Ocean were used in this study.

## 2. Material

### 2.1. VMS data

Since 2000, the European Commission legislated that all European fishing vessel longer than 24 meters should be equipped with a Vessel Monitoring System (VMS) (and then all vessels longer than 15m, in 2005). The Global Positioning System (GPS) positions of the vessels were registered every hour and transmitted on shore by satellite (Argos or Inmarsat). Being GPS positions, the data were accurate (error smaller than few tens of meters) and regularly recorded every hour. Speeds (in knots) and turning angles (in radians) between consecutive positions were readily calculated from VMS data. The data used for this study were collected from the French purse-seiners based in the Seychelles islands, targeting tropical tuna species: yellowfin tuna (*Thunnus albacares*), skipjack (*Katsuwonus pelamis*), and bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Western Indian Ocean (14 vessels in 2006, 18 vessels in 2007, with a total catch around 100 000 tons per year). Given the shoaling behaviour of tropical tunas and given the fact that fishers base their decision to fish on visual detection of tuna schools, fishing activity occurs at day. Consequently only the daytime parts of the individual trajectories were then used. Starting and ending time of the day were deduced from the date and the latitude and longitude of each GPS position through an ad hoc routine to automatically select the daylight VMS data (**Figure 1**).

### 2.2. Observers' data

The scientific observers' program conducted in the French purse-seiner fleet operating in the Indian Ocean is being undertaken in the framework of the European Data Collection Regulation. This regulation specifies that 10% of the trips have to get an observer on board. From November 2005 to the end of 2007 only 11 trips (corresponding to 301 days at sea and 265 sets) were available for the analysis. Observers on board recorded the position of the vessel every hour, or each time a change in speed or in turning angle (cap) occurred. The beginning and the ending time of each fishing operation were also reported as well as the fishing mode (i.e., non-associated school or free-swimming school and FAD school). It should be stressed that these two types of fishing modes are developed in the Atlantic and the Indian oceans since the development of FADs fishing operations in the early 1990s (Ariz et al, 1999; Hallier and Parajua, 1999).

A subset of VMS data, corresponding to observers' data, was extracted with the objective to tune some of the model parameters and, more importantly, to validate the model outputs before its application to the entire data set. It also allowed exploring if the behaviour of the vessel prior to fishing could be used to discriminate between free-swimming sets and FAD sets.

### 3. Method

#### 3.1. Estimation of activities on the VMS trajectories

The model, for which a thorough description can be found in Walker and Bez (submitted)<sup>3</sup>, proceeds in two phases.

First, any hourly segment (step) of the trajectories was assigned to one of the three movement states defined for this study. The model consisted in a state-space model (Buckland et al. 2004, Royer et al. 2005, Patterson et al., 2008) where movement's states were assumed to follow an order one Markovian process. Although this framework has already been applied in other ecological issues (Morales et al., 2004, Jonsen et al., 2005), this is the first application to VMS data. States were inferred in a Bayesian framework (Gelman et al., 2004) knowing both vessel speeds and turning angles. Estimates corresponded to the state having the maximum a posteriori probability. The rationale behind the selection of the three states was the following. First, we expected a purse seiner to move quickly through abundance-poor areas. These "*cruising*" phases were associated to large speeds and to turning angles being predominantly around 0° (**Figure 2**). On the opposite, within areas where tuna schools are abundant, skippers try to track schools. In these "*tracking*" phase, apparent hourly speeds are expected to be smaller on average and turning angles should be widely distributed over the full circle. Finally, vessels can remain "*still*" for a while (fishing, school observations, engine break down, etc).

Second, thanks to observers' data, stillness steps were attributed one of the two possible main activities compatible with the absence of movement, namely "*fishing*" and "*stopping*" (**Table 1**). The "*fishing*" activity was attributed to steps where fishing was the dominant estimated activity, whereas "*stopping*" corresponded to a waiting time near a free-swimming school or near a FAD. Stops are required either to maintain electronic equipments located on FADs or to evaluate the effective presence of fishable schools. Long stops are sometimes due to technical break-downs and damages, although skippers try as much as possible to postpone the immobilization of the vessel until the night. Stops were thus considered as part of the searching operations and contribute to the fishing effort.

We thus ended up with four possible activities (**Figure 3**). Prior studies (Pella 1969, Pella and Psaropulos 1975, Gaertner et al, 1999) have described the sequence of successive fishing activities of a tuna purse seiner over a cruise. However they mainly concerned the detailed chasing and fishing processes which were not compatible with the behaviour components that were made available by hourly VMS data. It was thus not possible to rely on the former vocabulary developed by these authors and we fixed a new glossary.

The quality of the outputs of the model was finally evaluated thanks to the observers' data (field truth). 97% of the fishing sets declared by observers were detected by the model. However, some sequences (e.g. three fishing sets of two hours each separated by only a quarter of an hour) were viewed as only one long sequence of six fishing steps.

In order to more precisely quantify the differences between the true fishing sets and the estimated ones, we also compared:

- The statistical distributions of the sets durations (hourly rounded)
- The temporal patterns of fishing and non fishing activities depicted by both time series.

For the latter, we used simple and cross variograms which allow elucidating the dominant temporal patterns in each series and if these patterns are concomitant in both series.

---

<sup>3</sup> Walker E., and Bez N. (submitted). A pioneer validation of a state space model of vessel trajectories (VMS) with observers' data. Ecological Modelling.

Dealing with binary variable  $1(x) = \begin{cases} 1 & \text{if fishing} \\ 0 & \text{if not} \end{cases}$

the variograms can be interpreted in terms of probabilities (Rivoirard, 1994):

$$\gamma(t) = \frac{1}{2} E \left[ \left( 1_x - 1_{x+t} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} \left( P \left[ 1_x = 0 \text{ and } 1_{x+t} = 1 \right] + P \left[ 1_x = 1 \text{ and } 1_{x+t} = 0 \right] \right)$$

Assuming symmetry, this reduces to:

$$\gamma(t) = P \left[ 1_x = 0 \text{ and } 1_{x+t} = 1 \right] = P \left[ 1_x = 0 | 1_{x+t} = 1 \right] \cdot P \left[ 1_{x+t} = 1 \right]$$

Assuming stationarity, i.e. assuming that the probability to fish is well approximated by the overall mean

$$P \left[ 1_{x+t} = 1 \right] = P \left[ 1_x = 1 \right] = p_1$$

we finally get that:

$$\gamma(t) \propto P \left[ 1_x = 0 | 1_{x+t} = 1 \right]$$

i.e. that the variogram is proportional to the probability to be fishing knowing that  $t$  hours before (or after) this was not the case. After “a while”, the condition gets no longer influence and the variogram flattens to the product of probabilities, i.e. the variance. Variograms are fully analogous to Fourier transforms except that they decomposed the signal over time periods rather than time frequencies.

Cross-variograms (analogous to co-spectrum) are defined by

$$\gamma_{\text{OBS, VMS}}(t) = \frac{1}{2} E \left[ \left( 1_x^{\text{OBS}} - 1_{x+t}^{\text{OBS}} \right) \left( 1_x^{\text{VMS}} - 1_{x+t}^{\text{VMS}} \right) \right]$$

They quantify the common patterns present in the two signals. In the present case, if estimations were perfectly equal to the truth, all the simple the cross-variograms would be equal.

### 3.2. Components of the fishing activities

To analyse the components of the fishing activities, the heterogeneity among the vessels is highlighted in the box plots of the distances covered in the activities “tracking” and “cruising”, for the time spent in the four activities. The searching effort (as the time spent in the activities 2, 3 and 4 in each spatial square of  $0.25^\circ$  by  $0.25^\circ$ ) is also mapped at a fine spatial scale, and compared to the maps of the fishing sets.

As mentioned in the Introduction section, the current calculation of fishing effort for the tropical purse-seiners is defined as the number of daylight hours after removing (1) the “inactive” time spent in sets (it is admitted that during the set the vessel is not searching for tuna schools) and (2) some hours dedicated to technical repairs or cruising to or from the harbour to the fishing grounds. The time devoted to the fishing sets is deduced from the number of sets and the associated catch of the set reported on logbooks (a simple linear regression between the catch of the set and the duration of the set has been estimated regularly from observers’ programs). As a consequence we proposed to consider here the hours preceding a fishing set (Allen and Punsly, 1984), and then to evaluate among these “pre-fishing” hours how many are spent in the four activities.

## 4. Results

### 4.1. Distances and time spent in the activities

The distances covered in the VMS steps in “cruising” and in “tracking” by quarter from 2006 to 2007 showed the heterogeneity within the vessels at a quarter scale (**Figure 4**). There is evidence that the mean distance in cruising (2660 n.m.) is lower than the mean distance in tracking (3540 n.m.). The pattern within each year is similar for both activities: the distances increased from quarter 1 to 4 for cruising, whereas, for tracking activity, the distances increased only to quarter 3, then decreased in the fourth quarter. The highest heterogeneity in the covered distances concerns the tracking activity during the quarter 3 and 4 (in 2006 and 2007).

The cumulated time in the activities depicted the same pattern than for distances (**Figure 5**). However, the average time spent in tracking (385 hours) is quite twice higher than the time spent in cruising (210 hours) and in stop (200 hours). The time spent “tracking” is more heterogeneous between vessels than observed for the other two activities.

The distances covered and the durations spent within each sort of activity have been calculated for 5 areas in the Western Indian Ocean (**Figure 6**). The distances covered presented the same pattern for 2006 and 2007, with highest distances covered in North-West Seychelles, and secondarily in South-East Seychelles and Somalia areas

(**Figure 7**). However, the heterogeneity within vessels is more important in 2006 than in 2007. The time spent tracking is the largest particularly in NW Seychelles (**Figure 8**), whereas the durations are very heterogeneous within vessels.

#### 4.2. Temporal structure of the activity “fishing”

For the observers’ time series, the strongest pattern, i.e. the one that explains 90% of the overall variability of the fishing/non-fishing switch, was three hours (**Figure 9**). This corresponded to sequences of three successive steps with the same value (either 0 or 1). Knowing the fisheries, this has to be interpreted as the dominant duration of a fishing set (series of three consecutive ones). This pattern was common to both time series. It was however particularly salient in the simple variogram of the observers’ data and in the cross variogram, indicating that it was concomitant to both time series. Two extra temporal structures happened to be present in all the simple and cross variograms, namely:

- a three days pattern showing that the conditional probability to fish kept a memory over three days; batch of three days of fishing sets did occur
- a hole effect of 13 to 14 hours; this pattern reflected the fact that fishermen have the strong habit to realise sets on log-school early in the morning, i.e. a night apart from each others.

The time series of the model outputs got an extra structure compared to these ones. To quantify precisely this extra structure, we modelled the empirical variograms using only spherical models (the periodic spikes being excluded from the modelisation) and an automatic procedure based seeking for minimum square errors. While the variogram for the observers’ data happened to be:

$$\gamma_{\text{OBS}}(t) = 0.1 \cdot \text{sph}(h / 2.6) + 0.01 \cdot \text{spherical}(h / 26)$$

The best model for the VMS derived data was:

$$\gamma_{\text{VMS}}(t) = 0.088 \cdot \text{sph}(h / 3.1) + 0.033 \cdot \text{spherical}(h / 7.2) + 0.044 \cdot \text{spherical}(h / 44)$$

Apart from the fact that the dilution of the patterns estimated by the VMS was expected (slight increase of the range of the strongest pattern; from 2.6 to 3.1 hour), the main difference between the patterns of the two time series was thus a structure of 7 hours accounting for 20% of extra variance. This supports the idea that some (20%?) of the succession of two sets have been considered as one single set of 6 hours or so by the estimation procedure.

The cross structure being equal to that of the simple variogram of the observers’ data leads to consider that:

$$1^{\text{VMS}}(x) = 0.33 \cdot 1^{\text{OBS}}(x) + 0.18 \cdot \varepsilon(x)$$

where the error is temporally independent from the observers’ data but gets a structure of 7 hours. The physical interpretation of such a noise corresponded to two consecutive sets.

#### 4.3. Components of fishing effort

As mentioned previously, the current fishing effort is expressed as the total number of daylight hours minus the number of inactive hours (e.g., dedicated to fishing sets, etc.). Thus this calculation takes into account the hours of searching before the sets and these after the sets. The idea here is to consider only hours of search that precede every set. For every set, among the hours (of the same day) preceding the set, the proportion of hours spent in the activities fishing, stop, tracking, and cruising was estimated/calculated (**Figure 10**). Most of the time, the proportion of time spent in cruising, stop or fishing before a set was very low, in contrast to the proportion of time spent in tracking.

Every month, the total of fishing hours and of effort hours has been counted by  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  square (**Figures 11 and 12**). It should be stressed that few cells are empty because no vessel visited it. From these maps it was evidenced that VMS data allow mapping fishing actions and effort distribution with a high accuracy.

#### 4.4. Difference of effort components for sets on free-swimming schools and sets on FAD schools

From the subset of the VMS data corresponding to observers’ data, the two main fishing modes (free-swimming schools versus associated schools with FAD) were attributed to every fishing step. The number of fishing steps occurring at every hour of the day is represented for Free sets and FAD sets in **Figure 13**. In the early morning, fishing hours were more dedicated to FAD sets than for free schools sets, and then the proportion of FAD sets compared to the total number of sets decreased all along the day. In contrast, fishing hours ending on free schools sets were quite constant all along the day.

The components of the effort were considered also, when calculating the proportions of hours (preceding the sets, the same day) spent in each activity, but the histograms were built distinguishing the types of sets (free schools and FAD schools). Contrarily to the results obtained on the whole fleet and without distinction between fishing modes, it can be seen that the proportions of hours spent in stopping or tracking before a set were quite high, although the percentage of time spent in fishing or cruising were often low (**Figure 14**).

## 5. Discussion

Building abundance indices from commercial CPUEs remain problematic for many reasons: non-proportionality between CPUEs and abundance, such as hyperdepletion and hyperstability (Hilborn and Walters 1992, Harley et al, 2001, Polacheck, 2006), changes in fishing power (Fonteneau et al., 1999) or in fishing grounds (Walters, 2003) over the years, etc. Even if these criticisms remain valid at a global scale, improvements in the definition of individual fishing effort, and specifically the determination of the proportion of active versus inactive time, can be obtained from information on small-scale activities.

As far we are concerned, there were many applications of VMS data in different fishery studies (Bertrand et al., 2005, Witt et al., 2007, Mills et al., 2007) but none focussed on the determination of the different movement states of a fishing trip. The model on VMS data used in the present study has been validated on the activities “fishing” versus “no fishing”, on the subset of VMS corresponding to observers’ data. The misdetection rate which was obtained on the steps was about 10%, and the rate of under-detection on the sets was about 3%. It was showed a difference in searching behaviour of the vessels when they are fishing either on free schools or on FAD schools. These analyses required to be continued, because some variables indicating obviously the discrimination between sets on free schools and on FAD schools may consist on additional information used as a prior in the model.

## 6. Conclusion

VMS data are very profitable concerning the accuracy and exhaustiveness of the data, but require some statistical developments to make them usable for a thorough interpretation of fishing effort. The application of the Bayesian model allows us to distinguish two types of “searching” behaviours: the tracking and the cruising activities. VMS data are a valuable source of information for performing the fishing effort exerted on tropical tuna purse-seiners but require developing some methods adapted to this new type of fishing information.

## Bibliography

- Allen, R.L., and Punsly, R.G. 1984. Catch rates as indices of abundance of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, in the eastern Pacific Ocean. Inter-Am. Trop. Tuna Comm. Bull. **18**: 301–379.
- Ariz J, Delgado A, Fonteneau A, Gonzalez Costas F, Pallares P 1999 Logs and tunas in the Eastern Tropical Atlantic. A review of present knowledge and uncertainties. In: Scott MD, Bayliff WH, Lennert-Cody CE, Schaefer KM (eds) Proceedings of the International Workshop on Fishing for Tunas Associated with Floating Objects, La Jolla, CA, February 11–13, 1992. Inter-Am Trop Tuna Comm Spec Rep 11:21–65
- Bertrand, S., Burgos, J., Gerlotto, F., Atiquipa, J., 2005. Lévy trajectories of Peruvian purse-seiners as an indicator of the spatial distribution of anchovy (*Engraulis ringens*). ICES Journal of Marine Science 62, 447–482.
- Buckland S.T., Newman K.B., Thomas L., Koesters N.B. 2004. State-space models for the dynamics of wild animal populations. Ecol. Model. 171, 157–175.
- Fonteneau, A., Gaertner, D., and Nordstrom, V. 1999. An overview of problems in the catch per unit of effort and abundance relationship for the tropical purse seine fisheries. Coll. Vol. Sci. Pap. ICCAT 49 (3): 258-278.
- Gaertner, D., Pagavino, M. & Marcano, J. 1999 Influence of fisher's behaviour on the catchability of surface tuna schools in the Venezuelan purse-seiner fishery in the Caribbean Sea. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 56 :394-406.
- Gelman A., Carlin J.B., Stern H.S., Rubin D.B. 2004. Bayesian Data Analysis. Chapman & Hall/CRC, Second Edition, 698 pp.



Hallier JP, Parajua JI 1999 Review of tuna fisheries on floating objects in the Indian Ocean. In: Scott MD, Bayliff WH, Lennert-Cody CE, Schaefer KM (eds) Proc Int Workshop on Fishing for Tunas Associated with Floating Objects, La Jolla, CA, February 11–13, 1992. Inter-Am Trop Tuna Comm Spec Rep 11:195–221

Harley S. J., Myers R. A., and Dunn A. 2001 Is catch-per-unit-effort proportional to abundance? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 58:1760-1772.

Hilborn R., Walters C. J. 1992 Quantitative Fisheries Stock Assessment. Choice, Dynamics and Uncertainty. Chapman & Hall, New York. 570 pp.

Jonsen I.D., Flemming J.M., Myers R.A. 2005. Robust state-space modelling of animal movement data. *Ecology* 86, 2874–2880.

Mills C.M., Townsend S.E., Jennings S., Eastwood, P., Houghton, C.A. 2007. Estimating high resolution trawl fishing effort from satellite-based vessel monitoring system data. *ICES Journal of Marine Science* 64, 248–255.

Morales J.M., Haydon D.T., Frair J., Holsinger K.E., Fryxell J.M. 2004. Extracting more out of relocation data: building movement models as mixtures of random walks. *Ecology* 85, 2436–2445.

Patterson T.A., Thomas L., Wilcox C., Ovaskainen O., Matthiopoulos J. 2008. State-space models of individual animal movement. *Trends in ecology & evolution*, 23, 2, 87-94.

Pella J. J. 1969. A stochastic model for purse seining in a two-species fishery. *J. Theor. Biol.* 22, 205-226:

Pella, J. J., Psaropulos, C. T. 1975. Measures of tuna abundance from purse-seine operations in the eastern pacific ocean adjusted for fleet-wide evolution of increased fishing power, 1960-1971. *Interam. Trop. Tuna Comm. Bull.* 16, 4, 283-400

Polacheck, T. 1988. Analyses of the relationship between the distribution of searching effort, tuna catches, and dolphin sightings within individual purse seine cruises. *Fish Bull US.* 86, 2, 351-366

Polacheck T. 2006. Tuna longline catch rates in the Indian Ocean: did industrial fishing result in a 90% rapid decline in the abundance of large predatory species? *Marine Policy*, 30: 470-482.

Soto M., Pallarés P., Delgado de Molina A., Gaertner D. 2008. Standardized CPUE for juveniles yellowfin, skipjack and bigeye tuna from the european purse Seine fleet in the Atlantic ocean from 1991 to 2006. *ICCAT Sci. Doc. SCRS/2008/116*.

Rivoirard J., 1994. Introduction to disjunctive kriging and nonlinear geostatistics. Oxford, Clarendon Press. 181 p.

Royer F., Fromentin J.M., Gaspar P. 2005. A state-space model to derive bluefin tuna movement and habitat from archival tags. *Oikos* 109, 473–484.

Walters C. 2003 Folly and fantasy in the analysis of spatial catch rate data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 60 : 1433-1436.

Witt M.J., Godley, B.J. 2007. A Step Towards Seascape Scale Conservation: Using Vessel Monitoring Systems (VMS) to Map Fishing Activity. *PLoS ONE* 2, 10.

## TABLES

Table 1: Definition of the dominant states and activities per step. Discrimination between effective fishing and various elements contributing to prospecting.

			Dominant state per step			
			1	2	3	
			still	meander	straight	
Dominant activity per step	1	fishing	x			Fishing. Recorded by observers. Coverage: 10% of the fleet
	2	stop	x			
	3	tracking		x		Non fishing. Components of fishing effort. Not recorded by observers.
	4	cruising			x	

## FIGURES

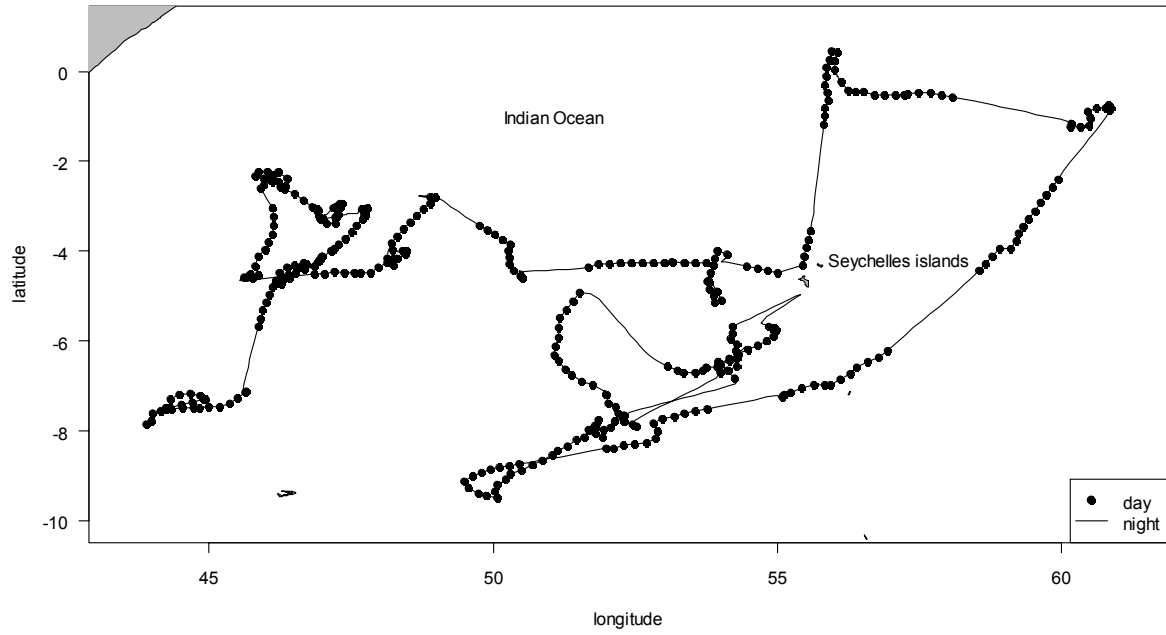


Fig. 1: Example of a trajectory of a tuna purse seiner during a fishing trip from VMS data. Continuous line represents activity at night; dotted line represents daily activity.

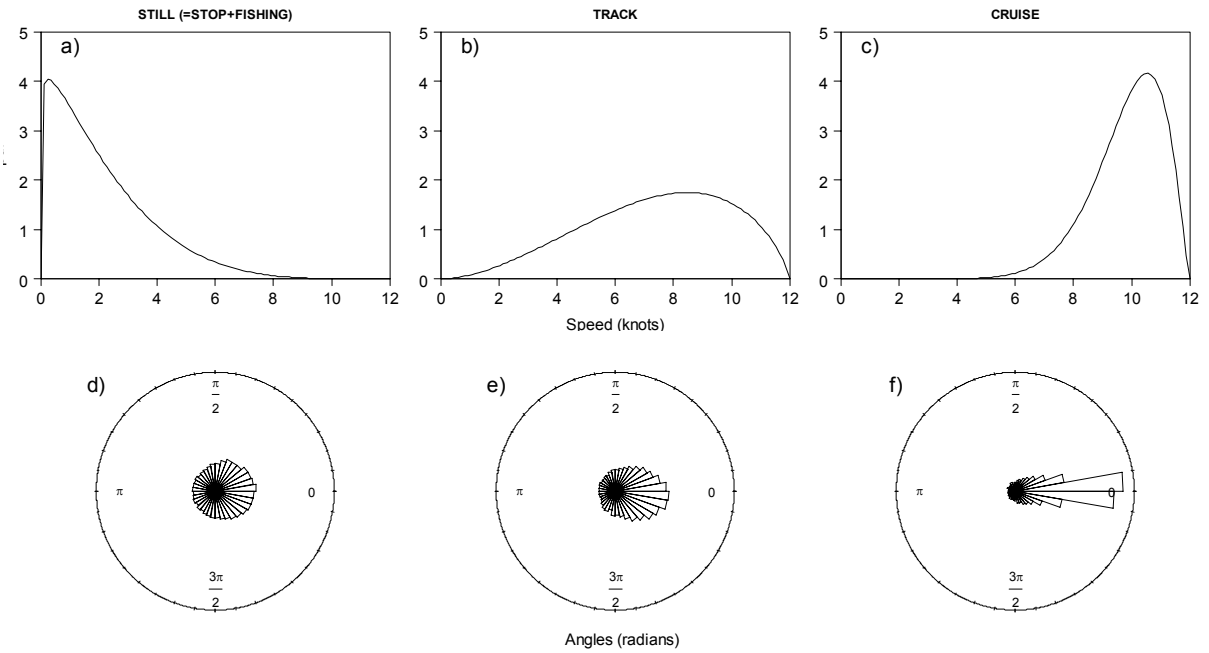


Fig. 2: Distributions of speeds (a, b, c) and turning angles (c, d, e) for the three estimated states (cruising, tracking, still) from the Bayesian model.

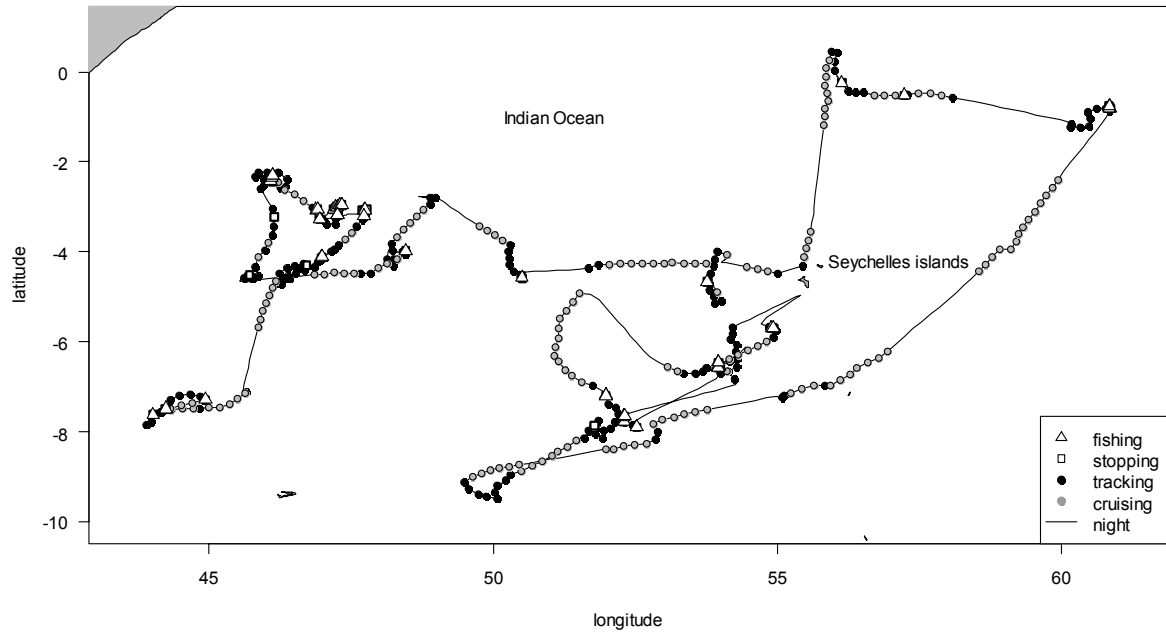


Fig. 3: Example of trajectory of a tuna purse-seiner with the four activities estimated on daily VMS positions from the Bayesian model.

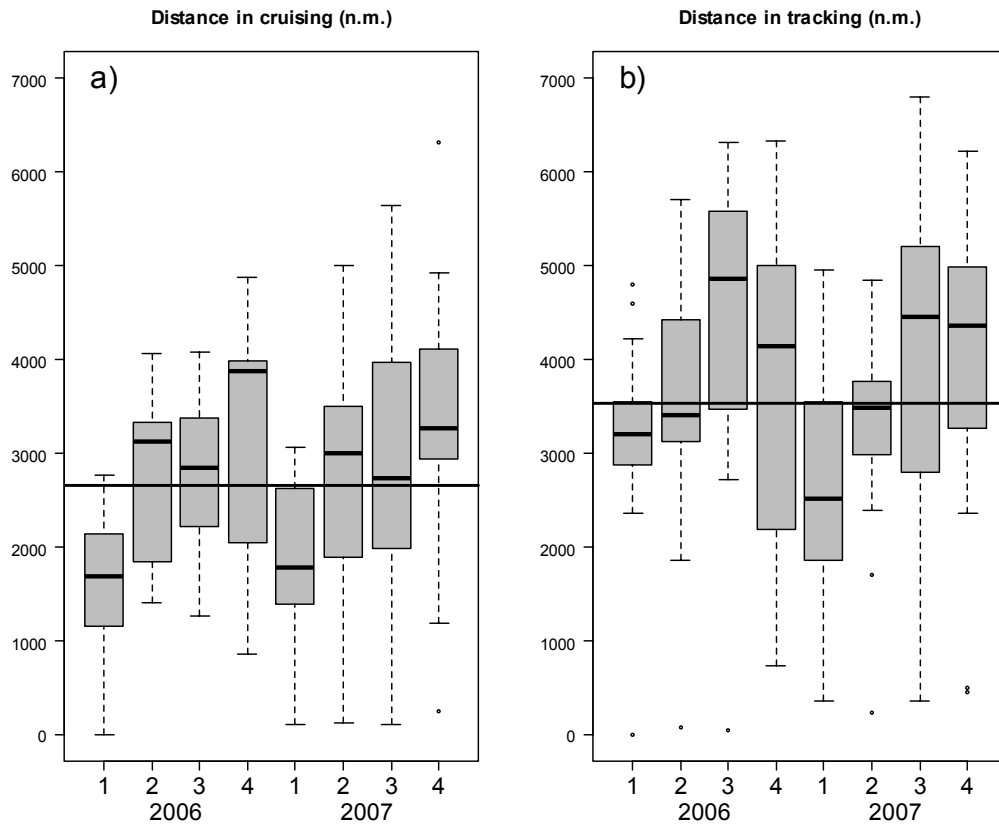


Fig. 4: Cumulated distances (in nautical mile) during the activities “cruising” (a) and “tracking” (b) calculated for every quarter in 2006 and 2007 (all vessels’ VMS). The horizontal lines represent the mean distances for each activity for the two years. The quarter 1 is from January to March, the second one from April to June, the third one from July to September, and the fourth one from October to December.

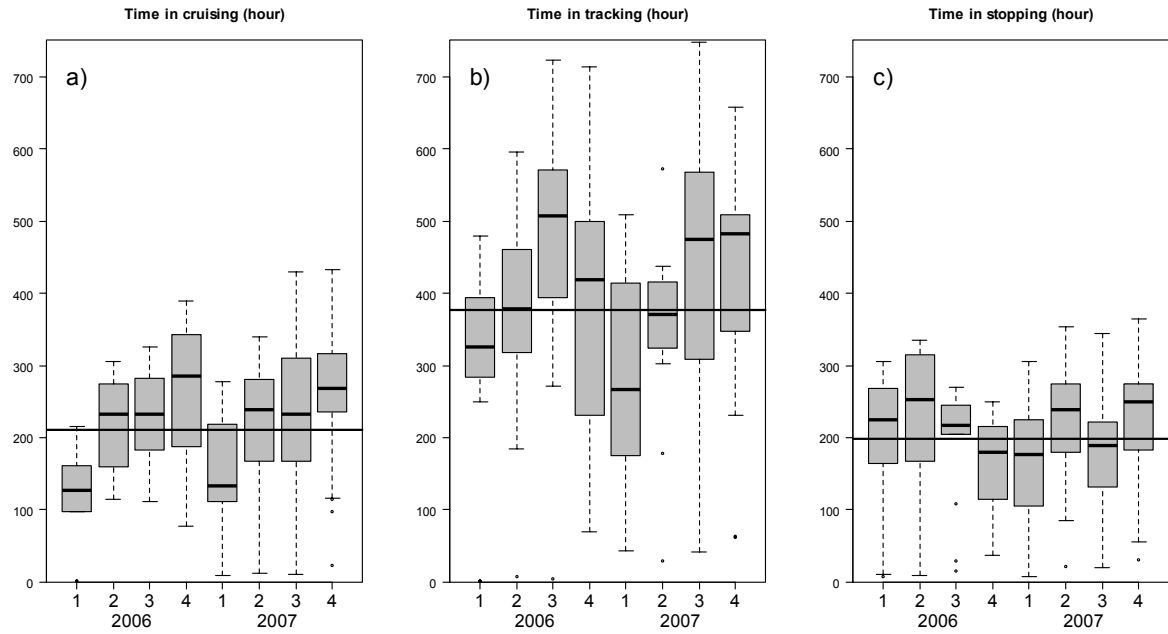


Fig. 5: Cumulated time (in hour) in the activities “cruising” (a) and “tracking” (b) and “still (stopping+fishing)” (c) calculated for every quarter in 2006 and 2007 (all vessels’ VMS).

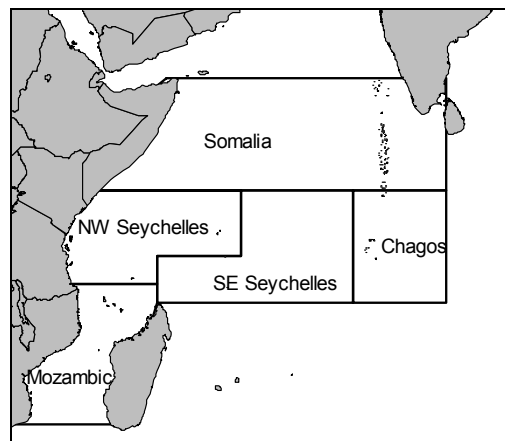


Fig. 6: Areas of the West Indian Ocean.

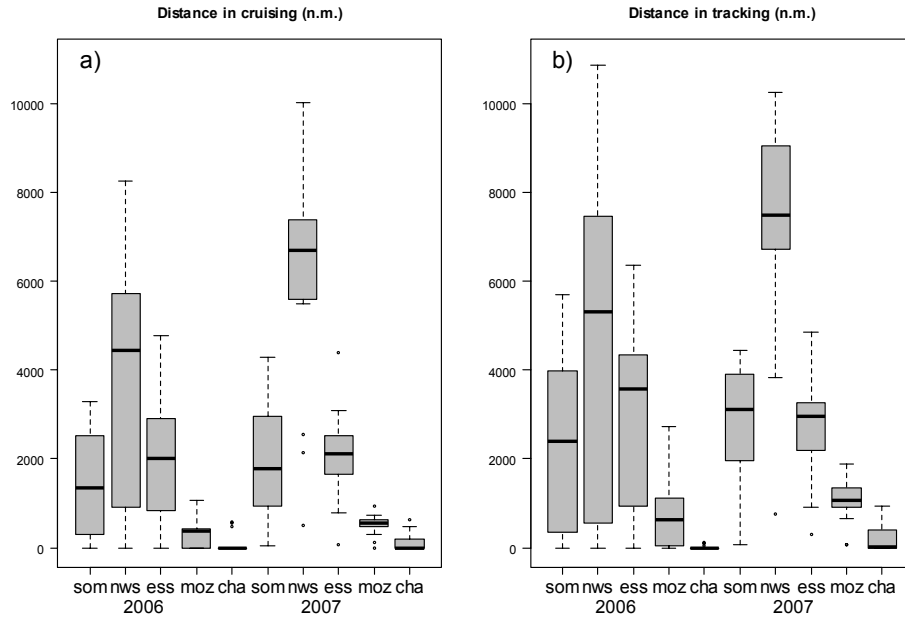


Fig. 7: Cumulated distances (in nautical mile) during the activities “cruising” (a) and “tracking” (b) calculated for every area in 2006 and 2007 (all vessels’ VMS). The areas are the Somalia, North-West Seychelles, East-South Seychelles, Mozambic channel, and Chagos areas defined in Fig.6.

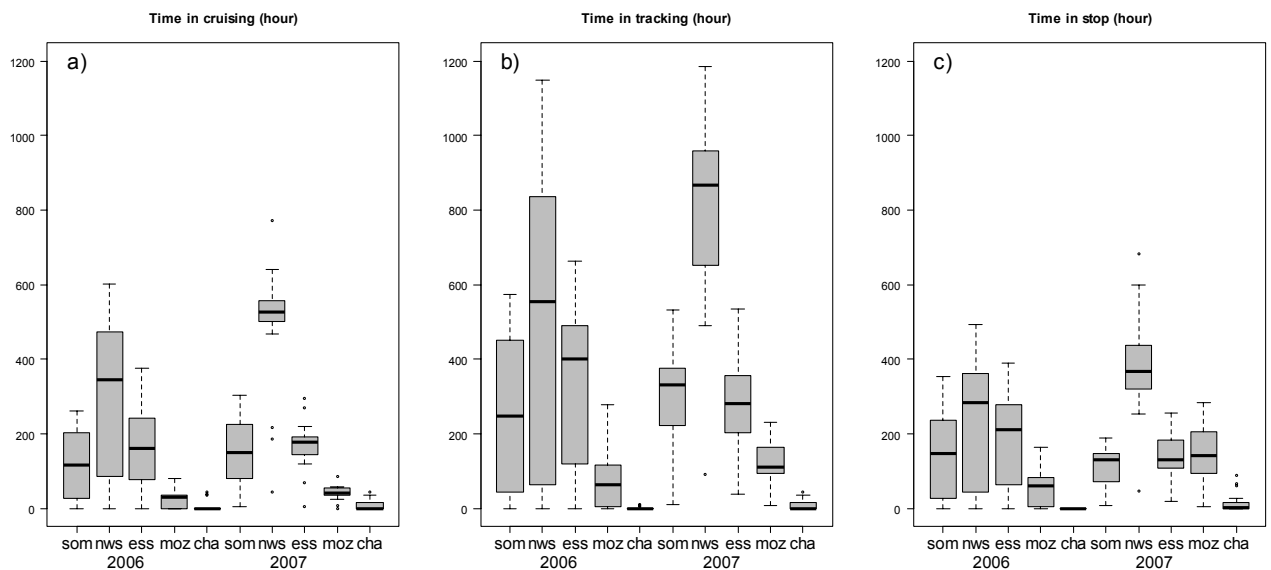


Fig. 8: Cumulated time (in hour) in the activities “cruising” (a) and “tracking” (b) and “still (stopping+fishing)” (c) calculated for every area in 2006 and 2007 (all vessels’ VMS). The areas are the Somalia, North-West Seychelles, East-South Seychelles, Mozambic channel, and Chagos areas defined in Fig.6.

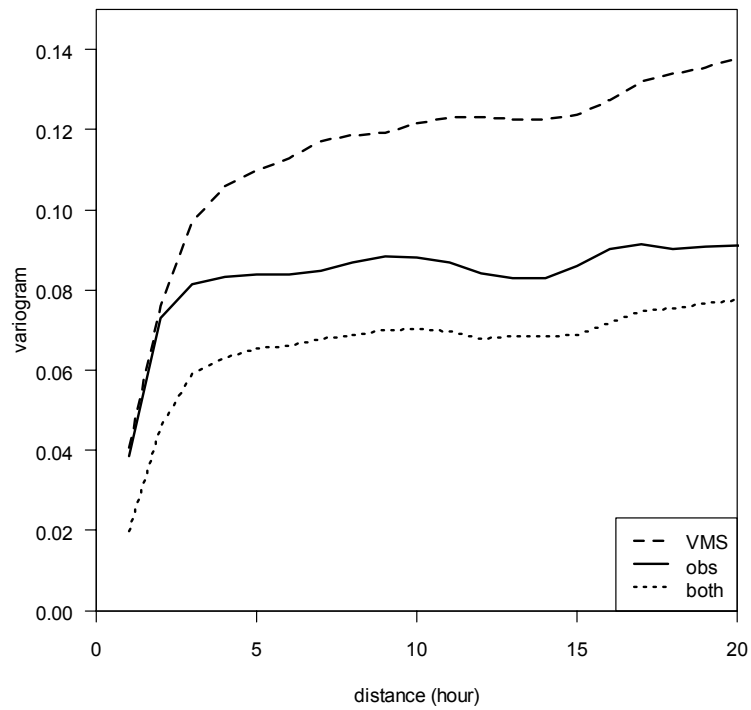


Fig. 9: 1D Variograms and cross-variogram for the steps in fishing.

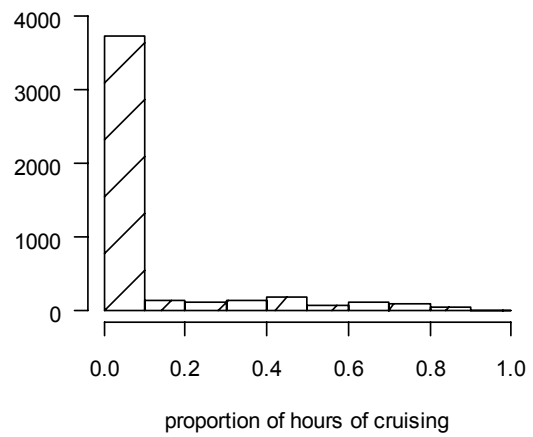
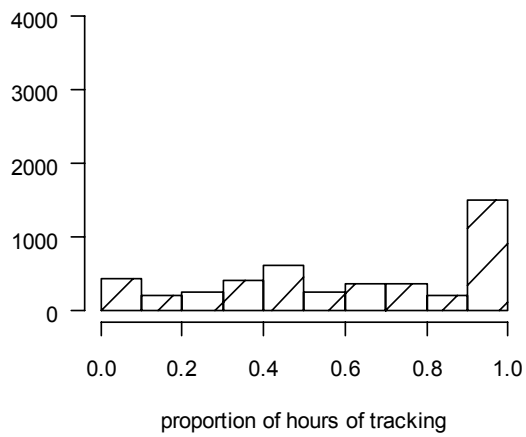
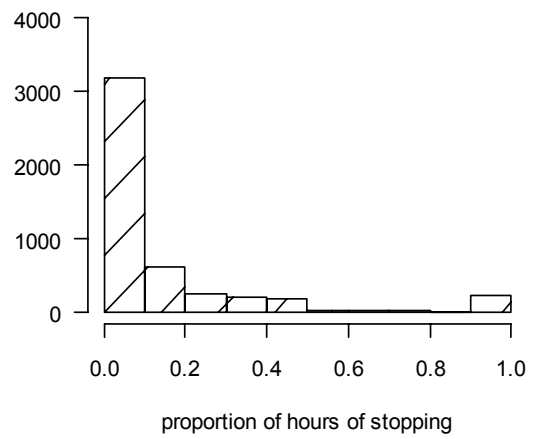
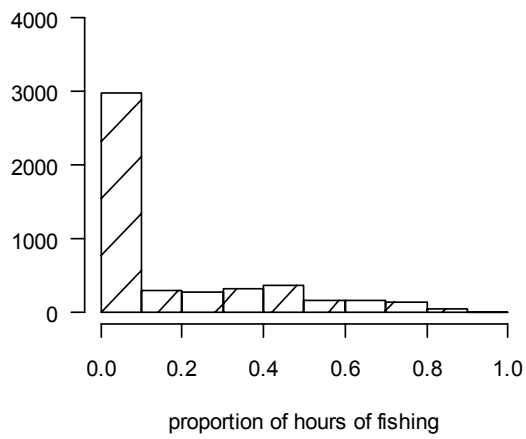


Fig. 10: Proportion of hours before a fishing set (and in the same day), spent in the four activities.

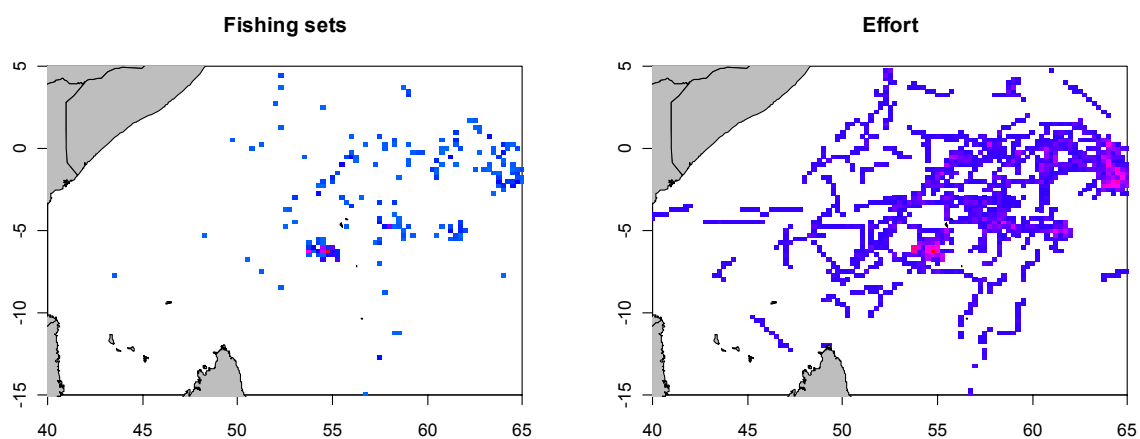


Fig. 11: Example of spatial repartition of the fishing hours and of the effort hours at the scale of  $0.25^\circ$  by  $0.25^\circ$ , for November 2006 (high number of hours in red, low number in blue, no vessel presence in white).

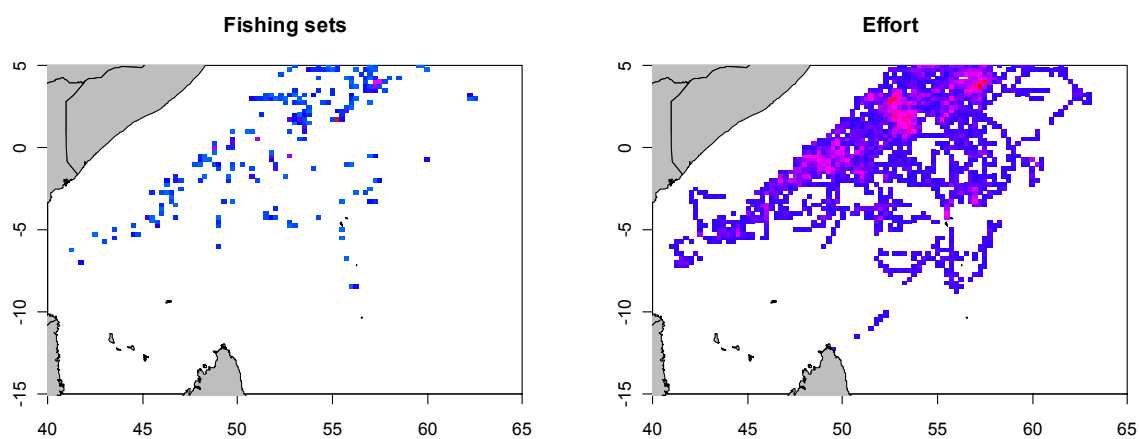


Fig. 12: Example of spatial repartition of the fishing hours and of the effort hours at the scale of  $0.25^\circ$  by  $0.25^\circ$ , for August 2007 (high number of hours in red, low number in blue, no vessel presence in white).

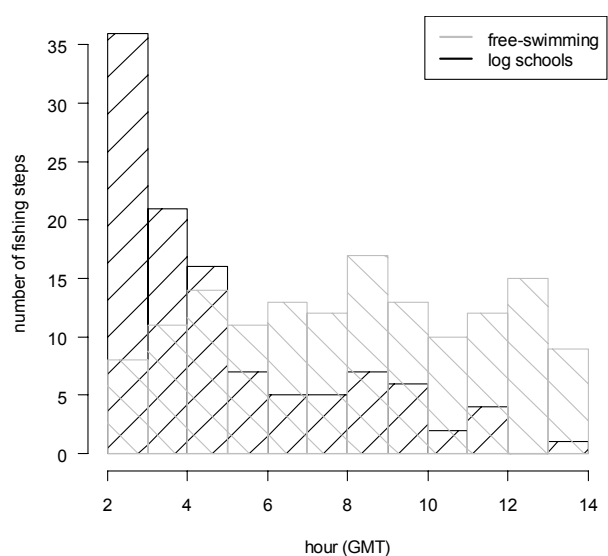


Fig. 13: Hours of daylight with steps in fishing (free schools or FAD schools).



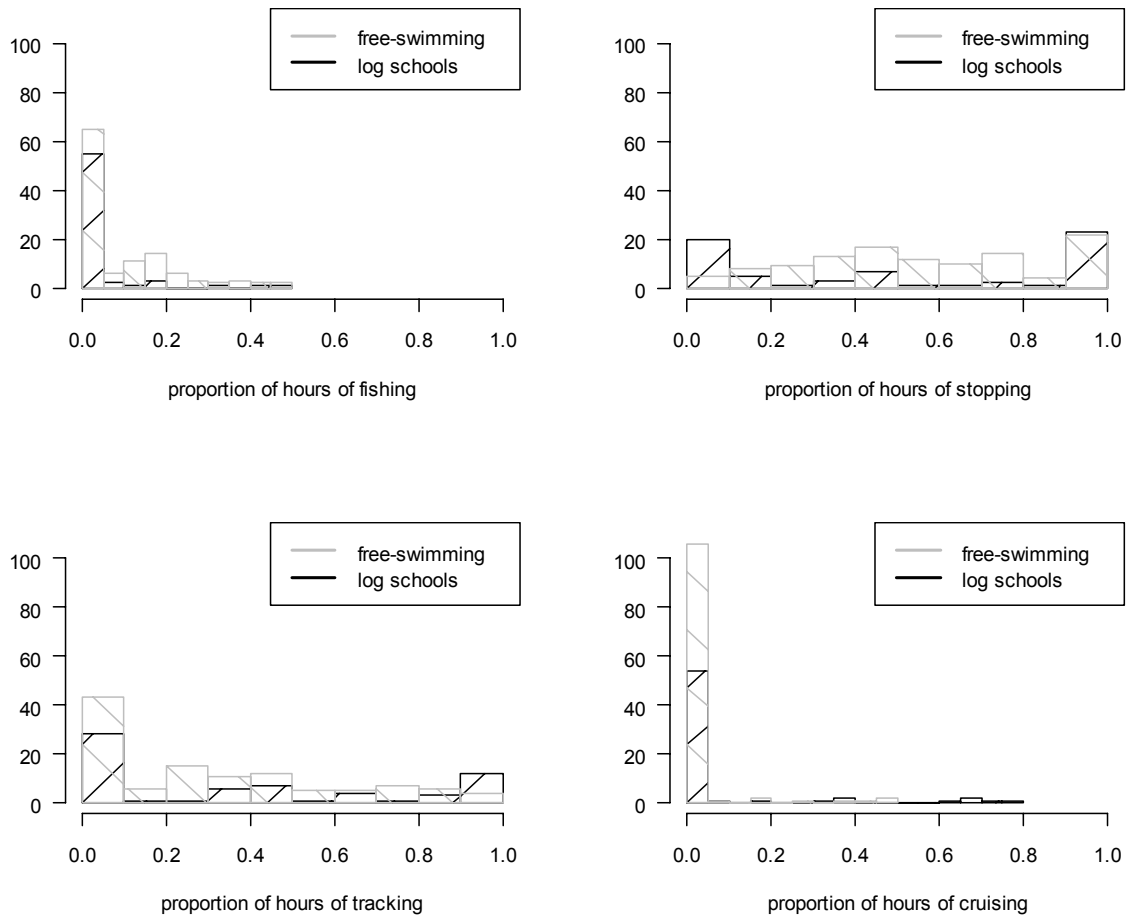


Fig. 14: Proportion of hours before a fishing set (and in the same day), spent in the four activities, for the two types of sets (sets on free schools and on FAD schools).



### Annexe 3 : Code R/BUGS

```
model{

  for (t in 2:T) {

    vit[t]~dbeta(alpha.mean[E[t]],beta.mean[E[t]])
    ones[t] <- 1
    ones[t] ~ dbern(wC[t])
    wC[t]<- ( 1/(2*Pi)*(1-rho.mean[E[t]]*rho.mean[E[t]])/(1+rho.mean[E[t]]*rho.mean[E[t]]
                                                    -2*rho.mean[E[t]]*cos(theta[t]-mu.mean[E[t]])) )/500

    E[t] ~ dcat(phi[t,E[t-1],])

  # matrice de transition :
    phi[t,1,1] <- trans1
    phi[t,1,2] <- 1-trans1
    phi[t,1,3] <- 0
    phi[t,2,1] <- trans2
    phi[t,2,2] <- 1-trans2-trans3
    phi[t,2,3] <- trans3
    phi[t,3,1] <- 0
    phi[t,3,2] <- trans4
    phi[t,3,3] <- 1- trans4
  }

  # Priors :
  alpha.mean[1]<- 1.036
  alpha.mean[2]<- 2.091
  alpha.mean[3]<- 18.41
  beta.mean[1]<- 4.744
  beta.mean[2]<- 1.588
  beta.mean[3]<- 3.632
  mu.mean[1]<- 0.1123
  mu.mean[2]<- 0.1317
  mu.mean[3]<- 0.01319
  rho.mean[1]<- 0.2408
  rho.mean[2]<- 0.5586
  rho.mean[3]<- 0.8966
  trans1.tau<-1/(trans1.sd*trans1.sd)
  trans2.tau<-1/(trans2.sd*trans2.sd)
  trans3.tau<-1/(trans3.sd*trans3.sd)
  trans4.tau<-1/(trans4.sd*trans4.sd)
  trans1 ~ dnorm(trans1.mean,trans1.tau)
  trans2 ~ dnorm(trans2.mean,trans2.tau)
  trans3 ~ dnorm(trans3.mean,trans3.tau)
  trans4 ~ dnorm(trans4.mean,trans4.tau)
  trans1.mean<- 0.7679
  trans2.mean<- 0.1831
  trans3.mean<- 0.228
  trans4.mean<- 0.2896
  trans1.sd<- 0.04896
  trans2.sd<- 0.03455
  trans3.sd<- 0.05015
  trans4.sd<- 0.04585
```

```
Pi <- 3.14159265359
```

```
# Contraintes :
```

```
O3 <- 1
```

```
O3 ~ dbern(constraint3)
```

```
constraint3 <- step( 1 - trans1)
```

```
O4 <- 1
```

```
O4 ~ dbern(constraint4)
```

```
constraint4 <- step(1 - trans2)
```

```
O5 <- 1
```

```
O5 ~ dbern(constraint5)
```

```
constraint5 <- step( 1 - trans3)
```

```
O6 <- 1
```

```
O6 ~ dbern(constraint6)
```

```
constraint6 <- step( 1 - trans4)
```

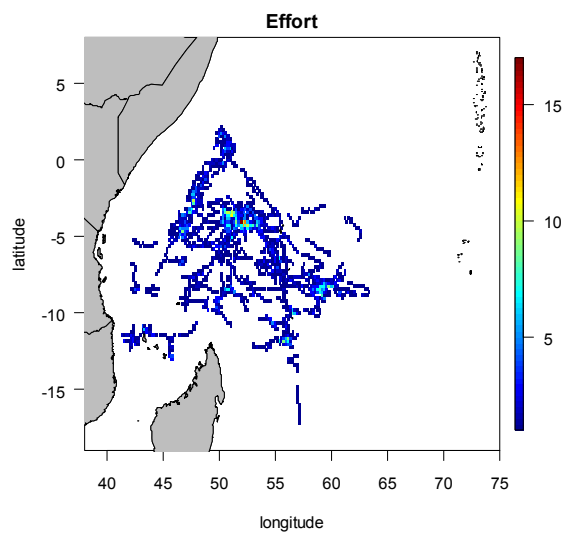
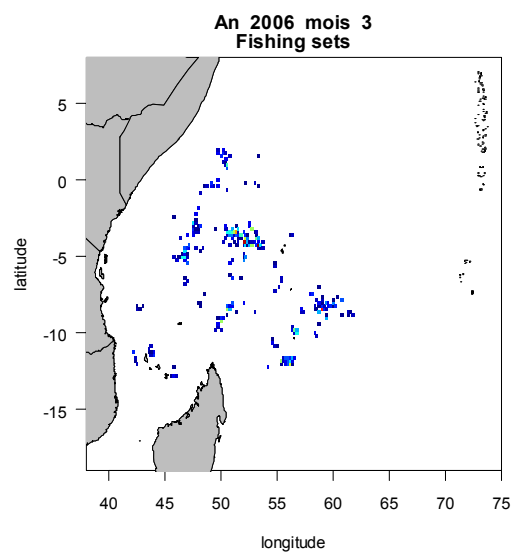
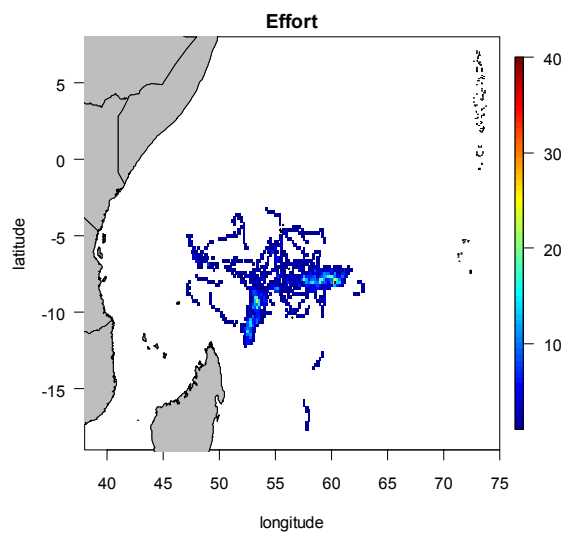
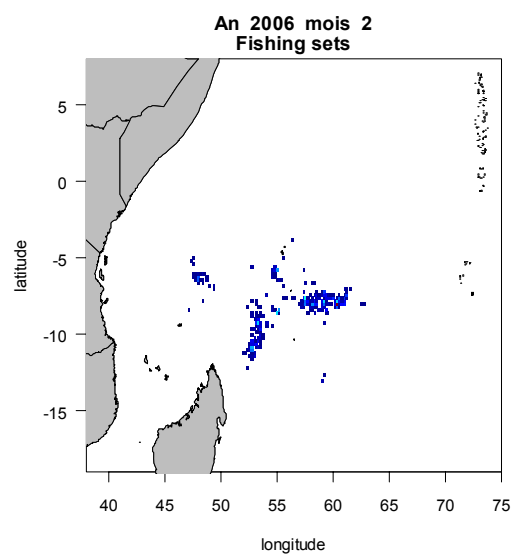
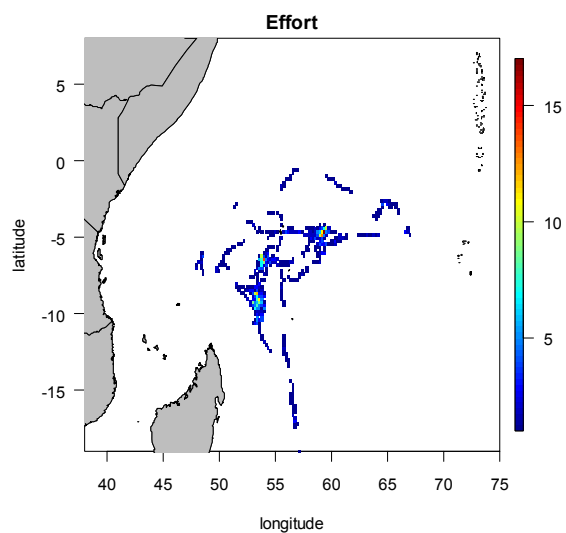
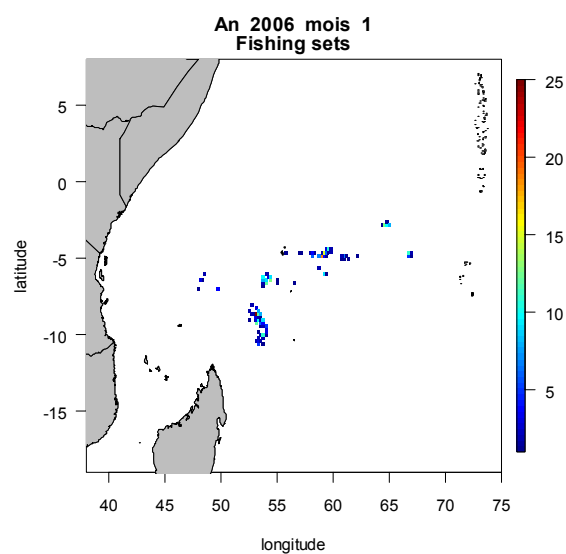
```
O7 <- 1
```

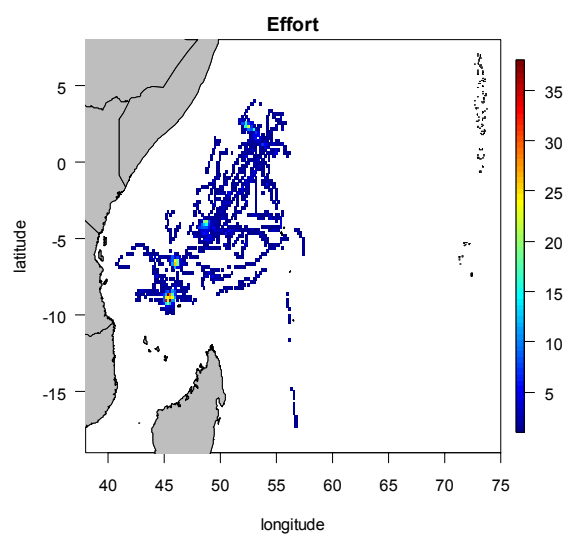
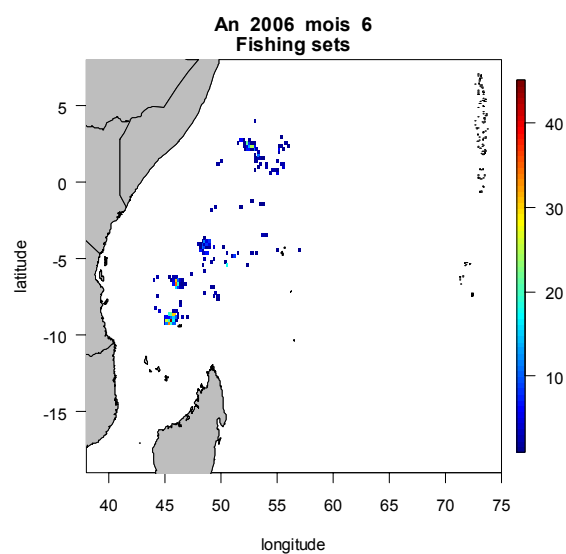
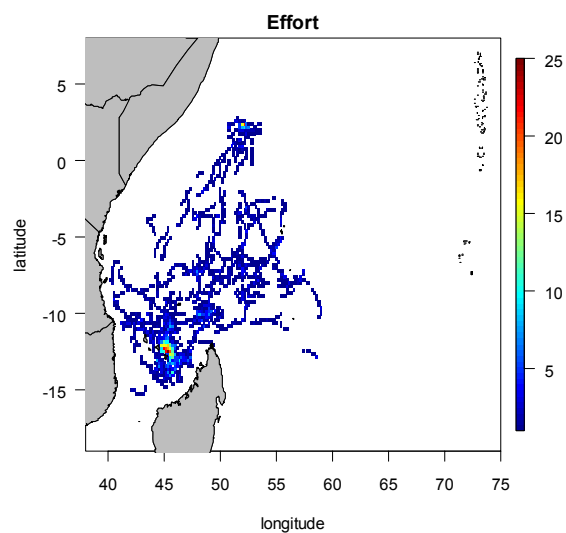
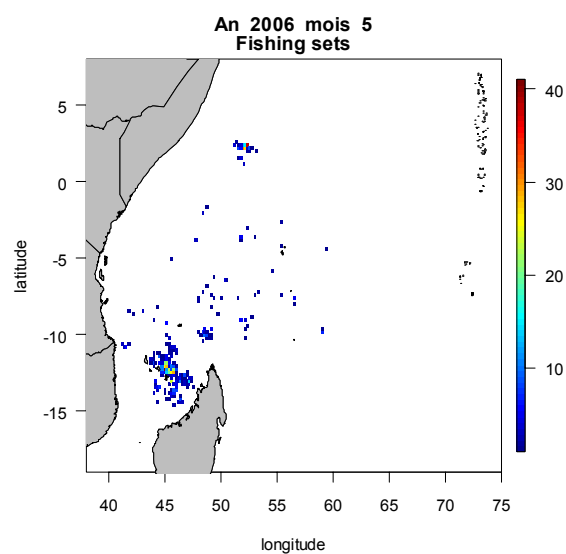
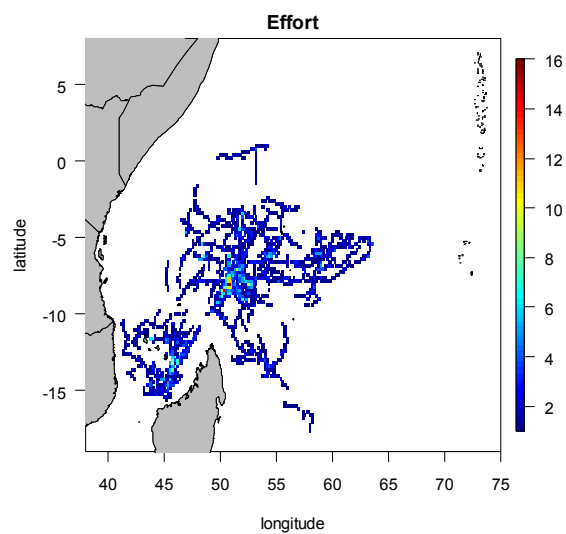
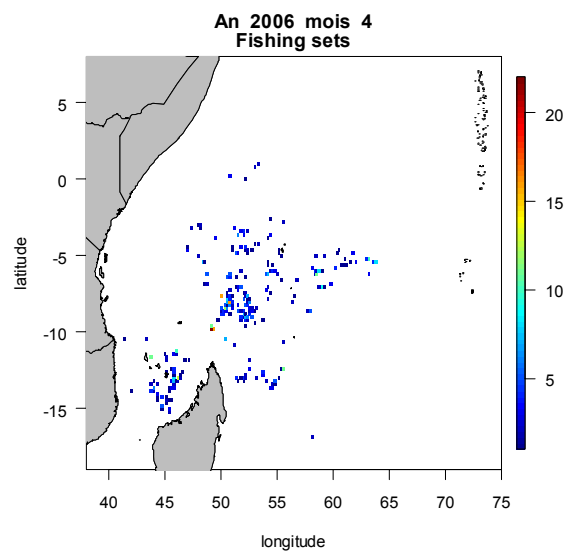
```
O7 ~ dbern(constraint7)
```

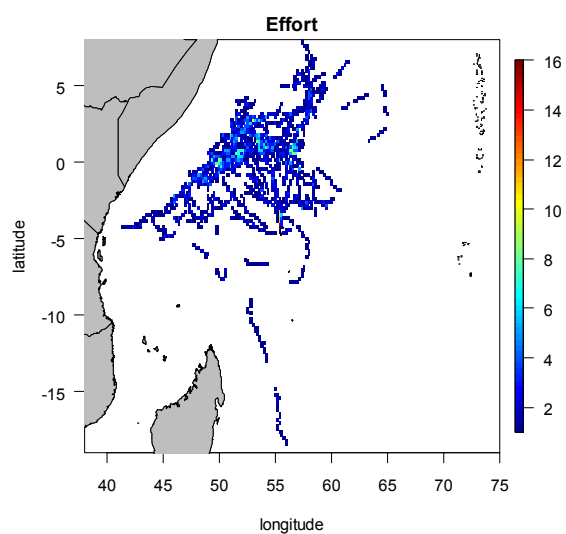
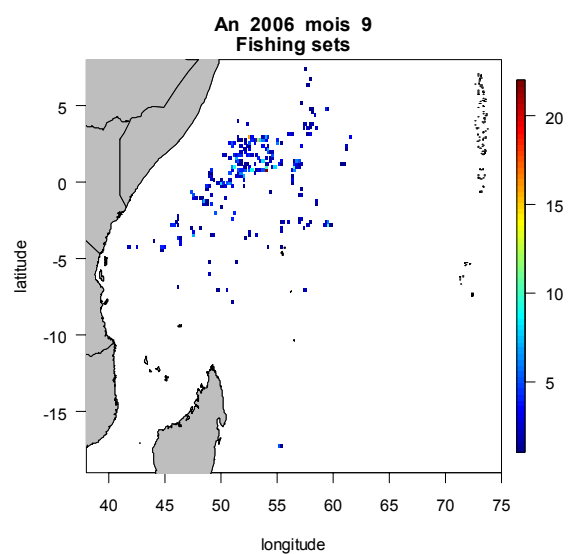
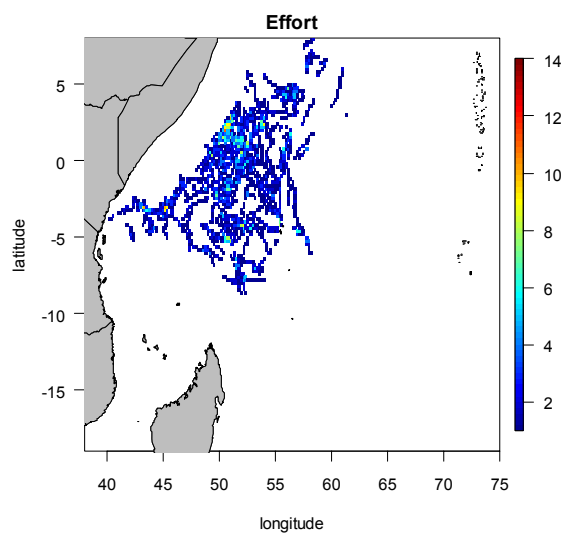
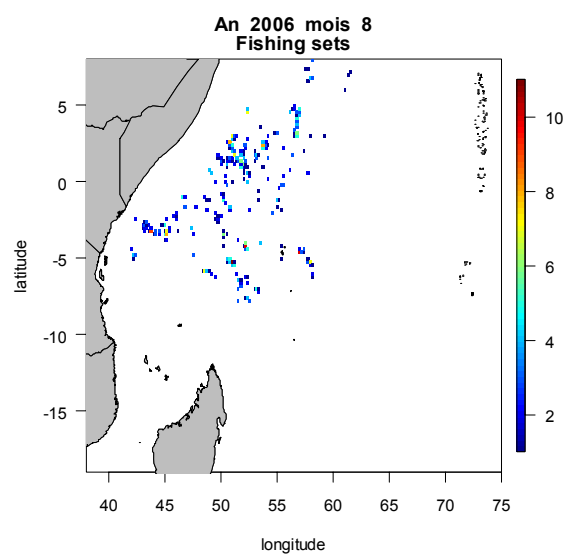
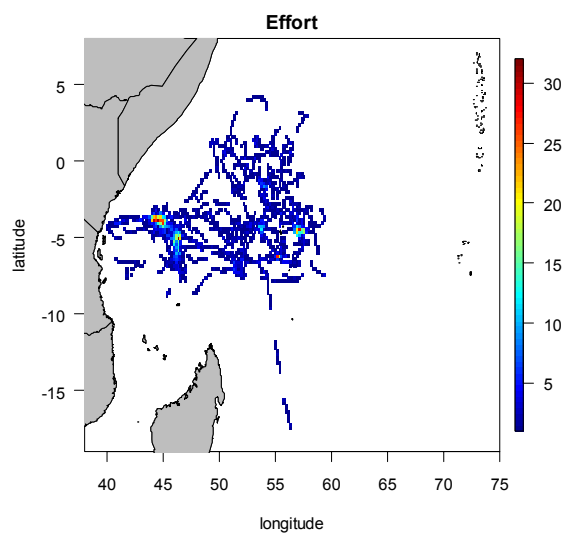
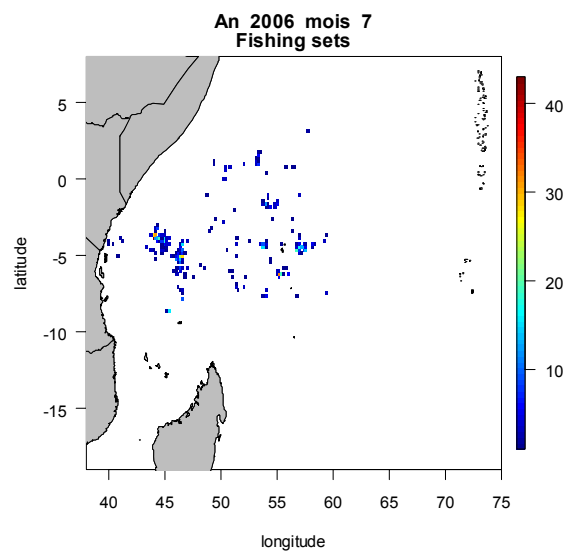
```
constraint7 <- step( 1 - (trans2+ trans3))
```

```
}
```

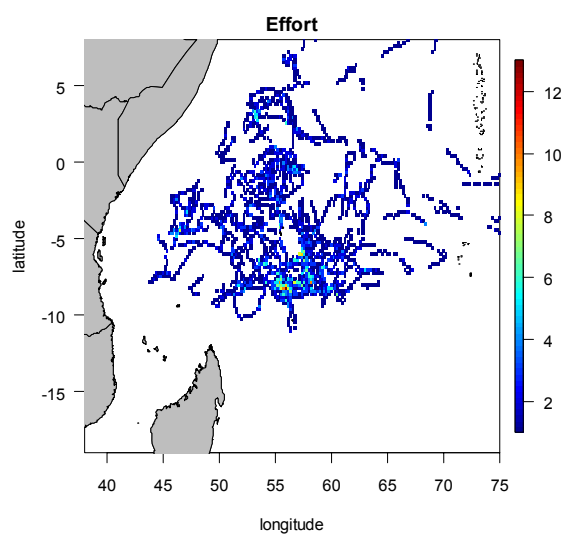
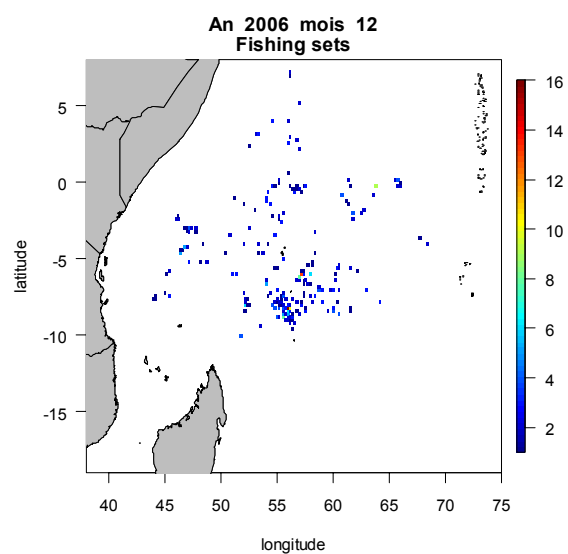
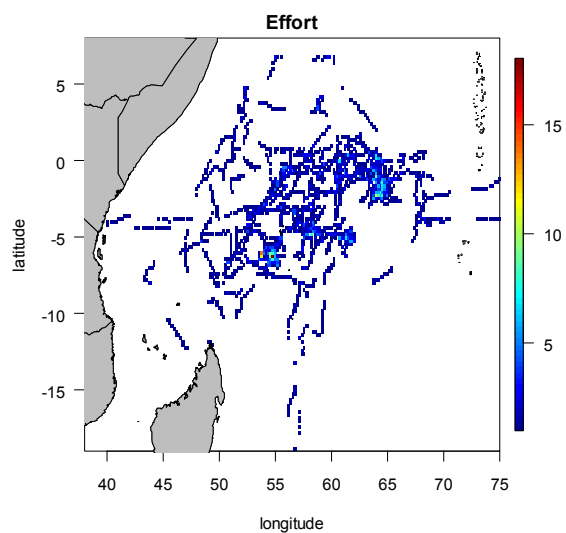
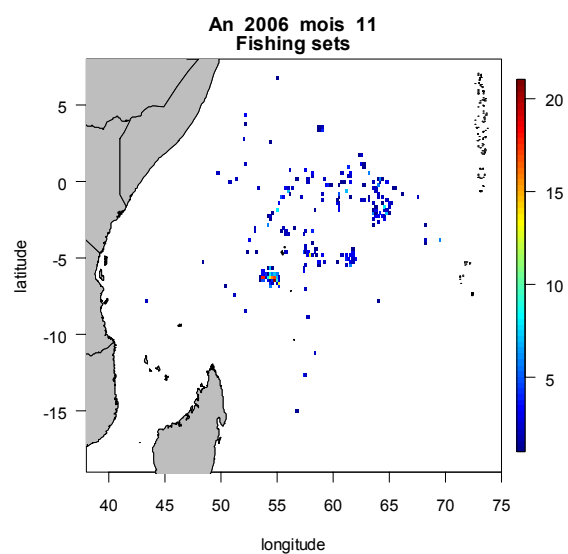
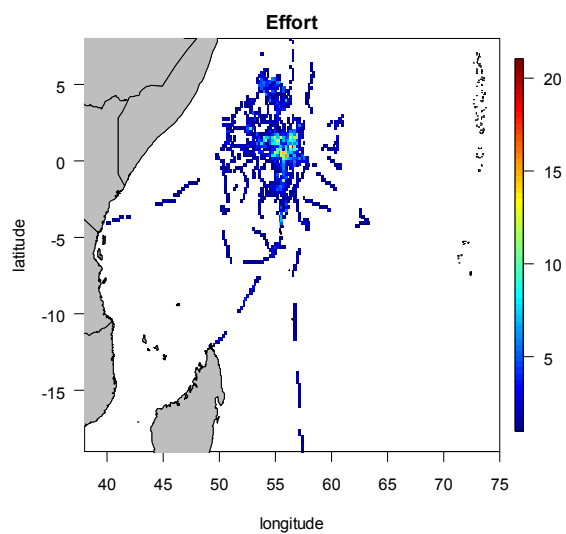
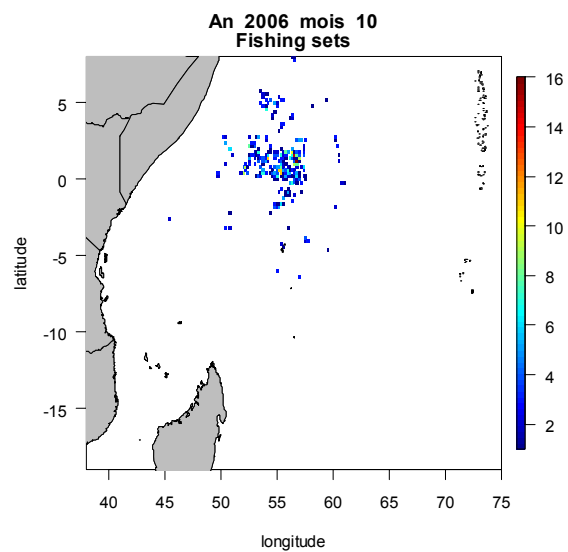
**Annexe 4 : Atlas des cartes de VMS de thoniers senneurs français des cartes effort/pêche**

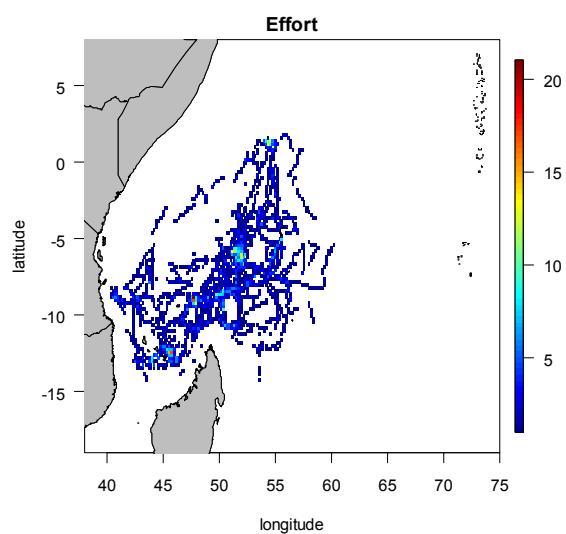
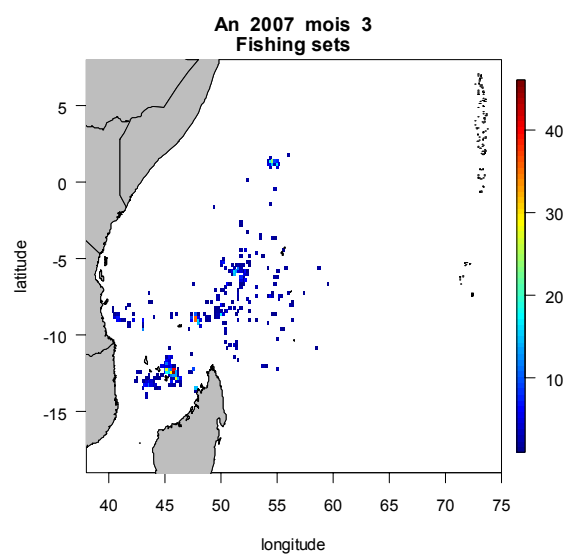
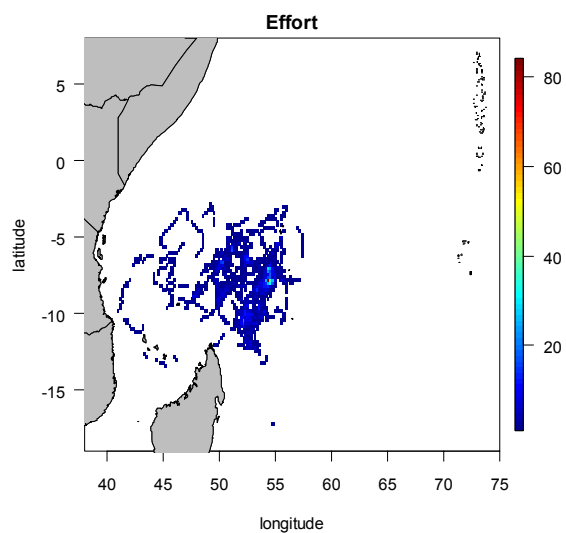
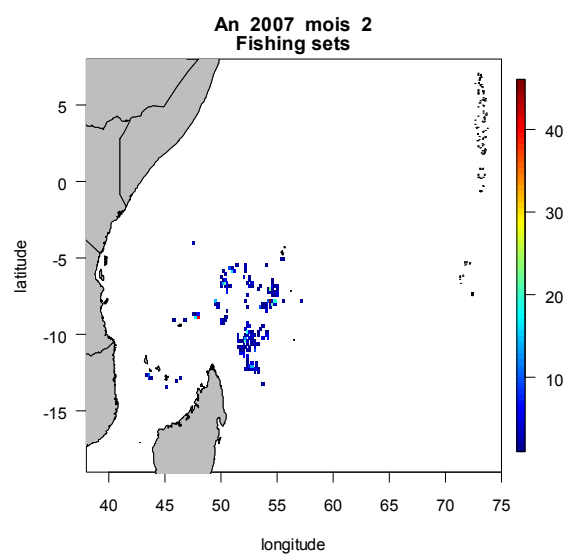
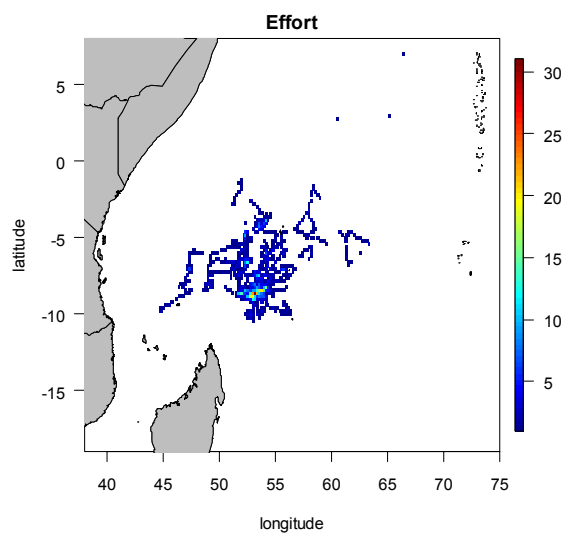
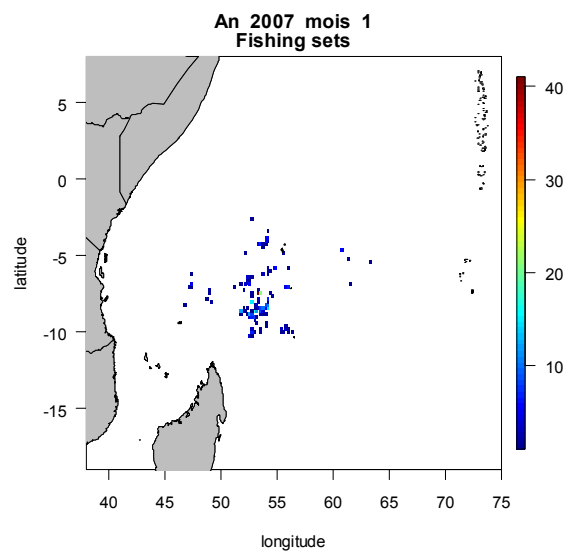


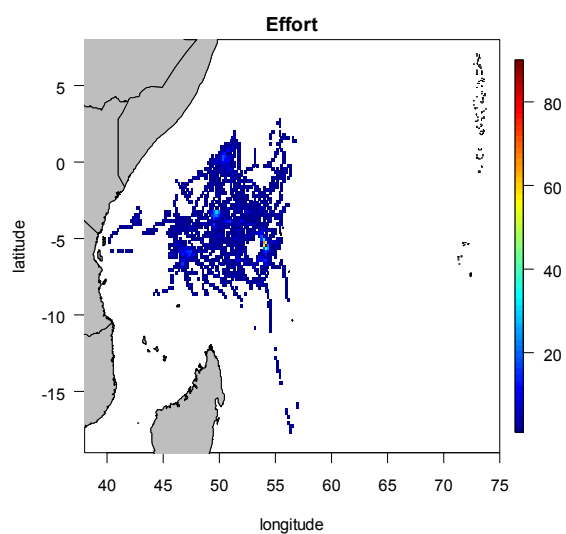
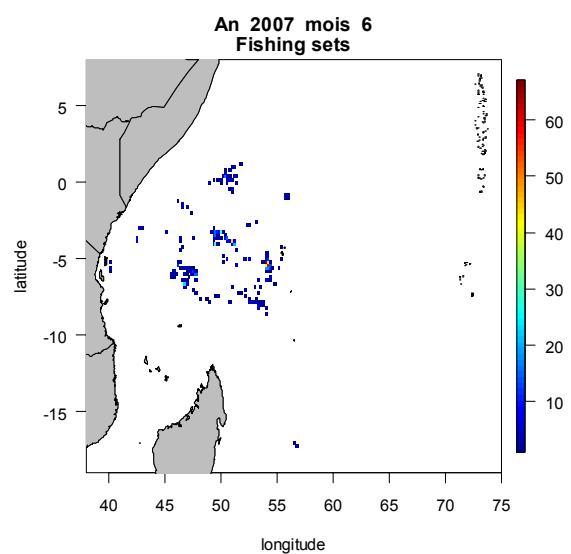
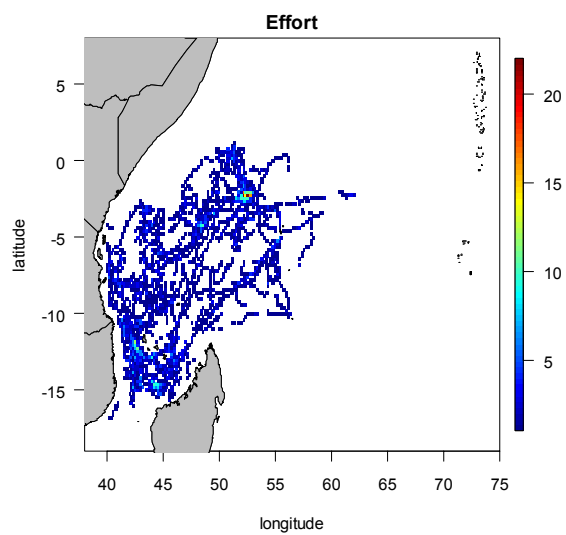
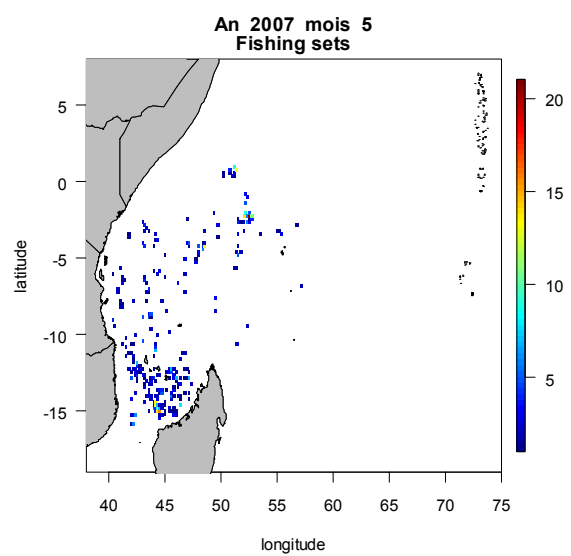
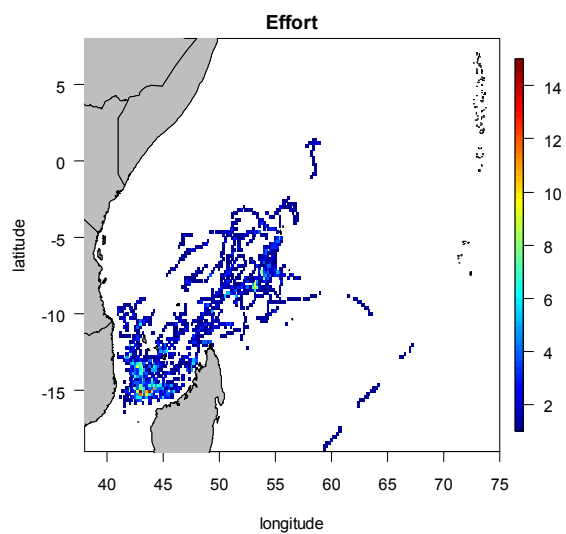
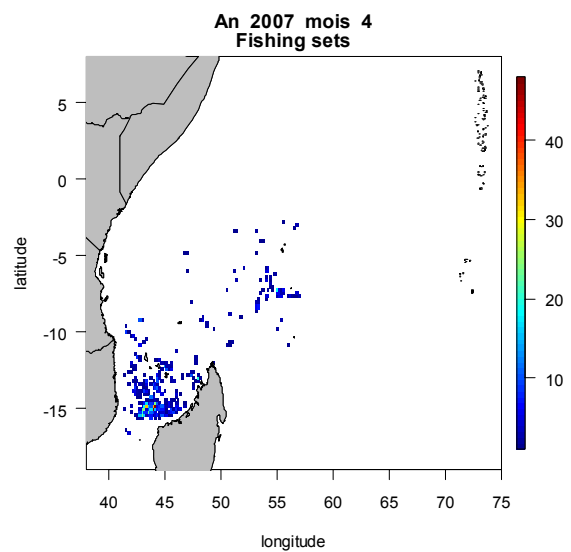


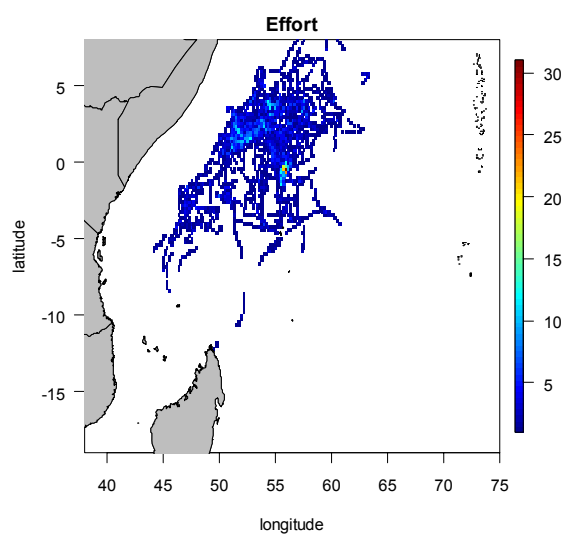
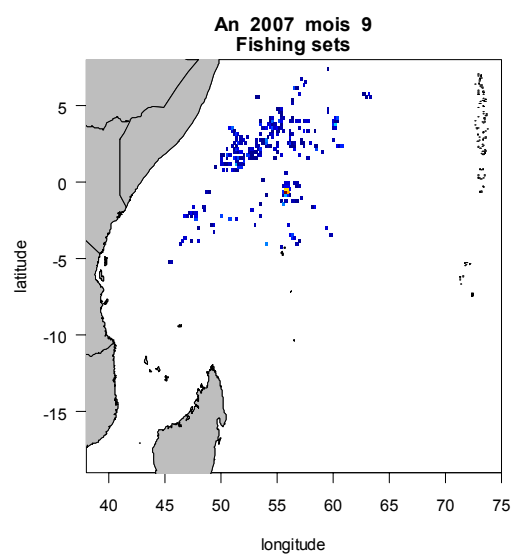
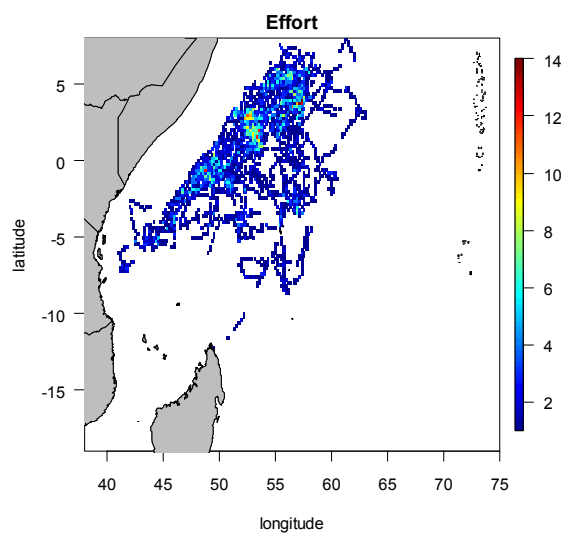
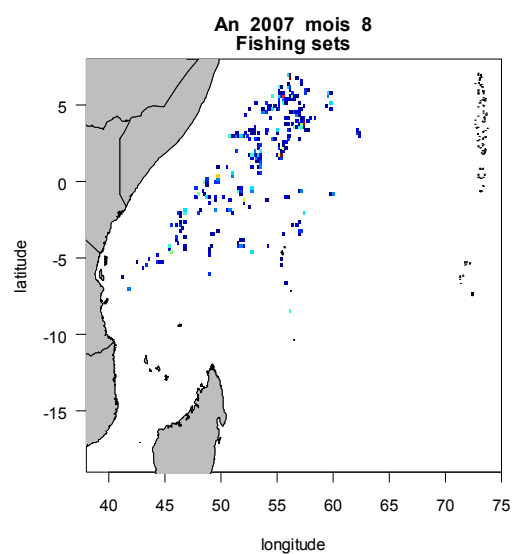
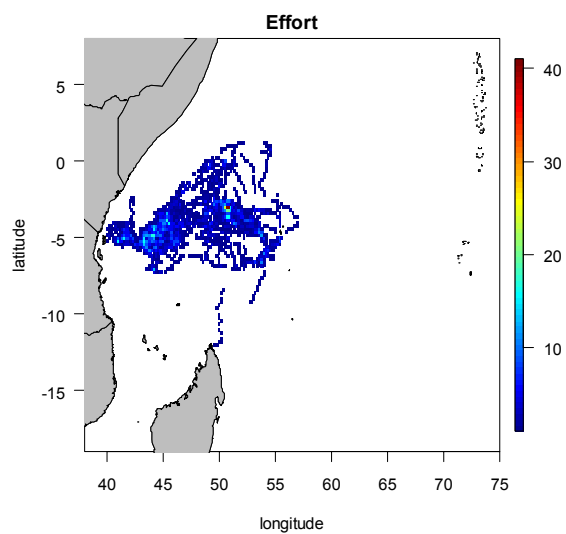
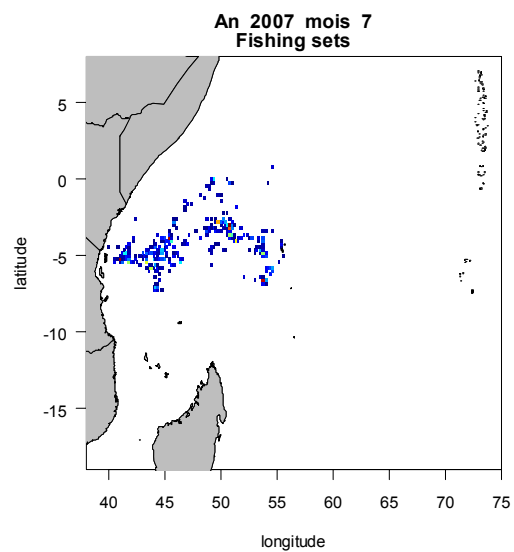


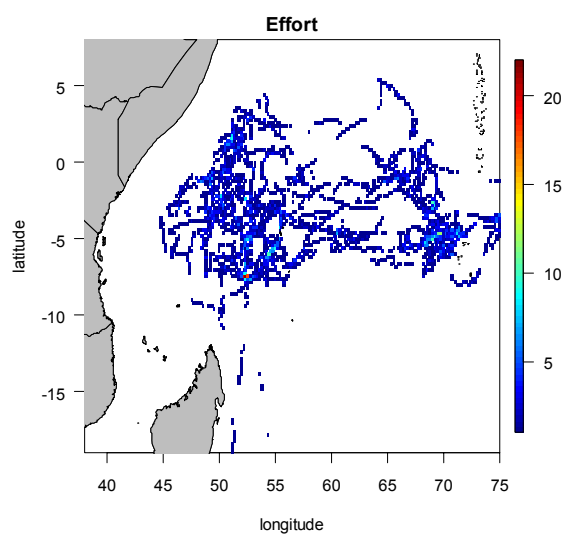
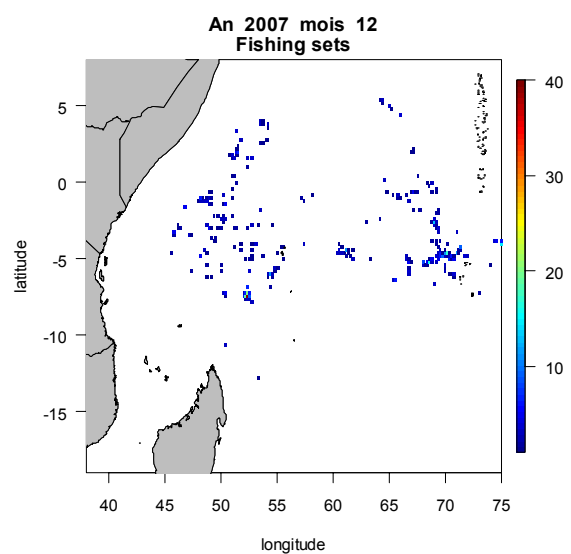
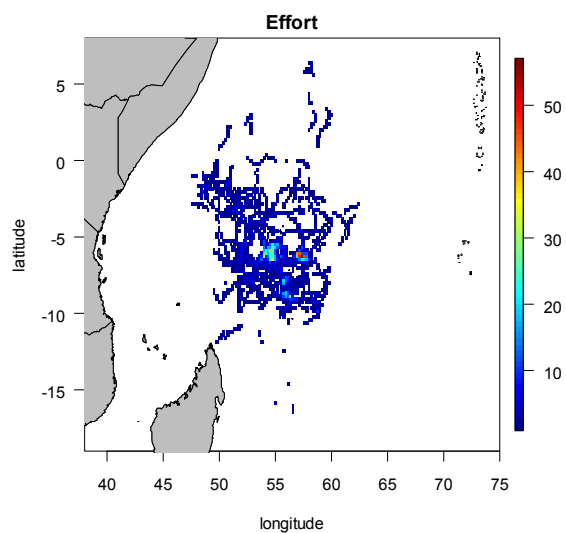
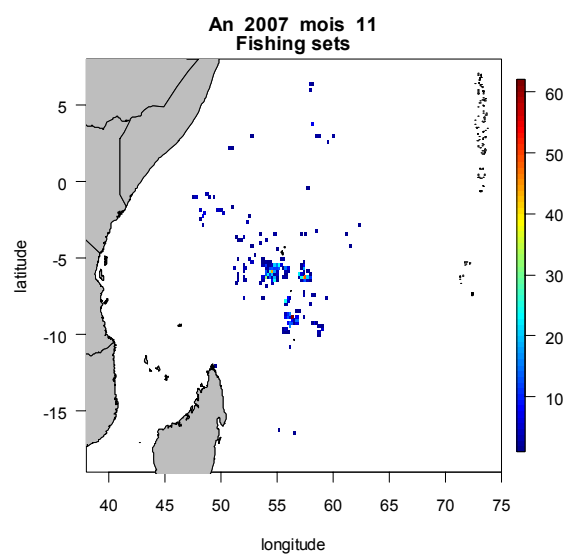
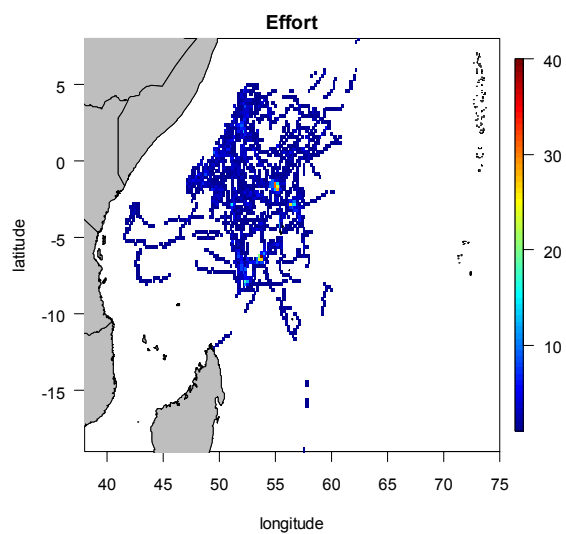
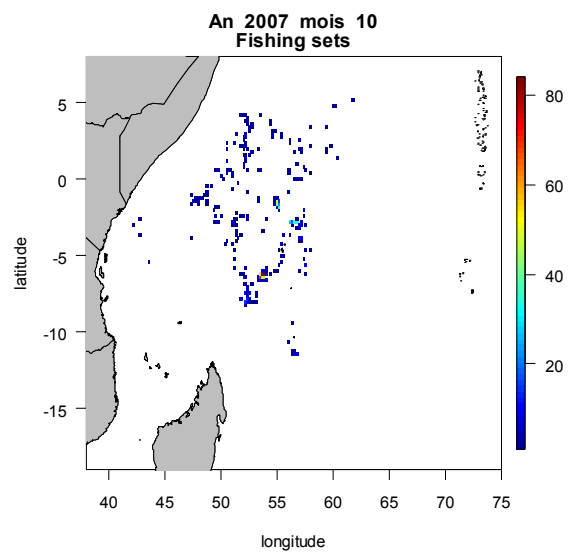


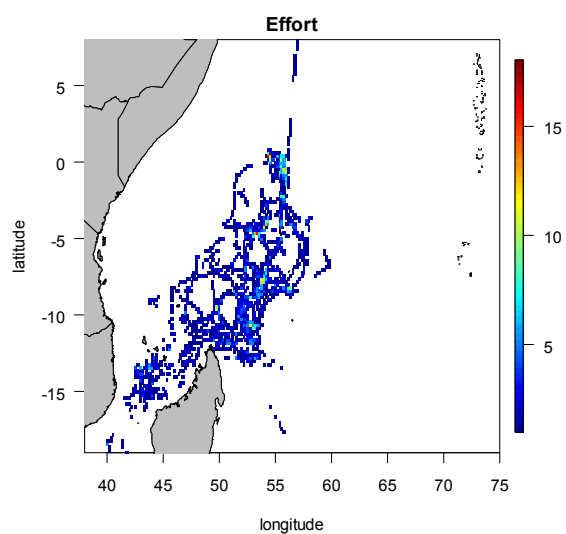
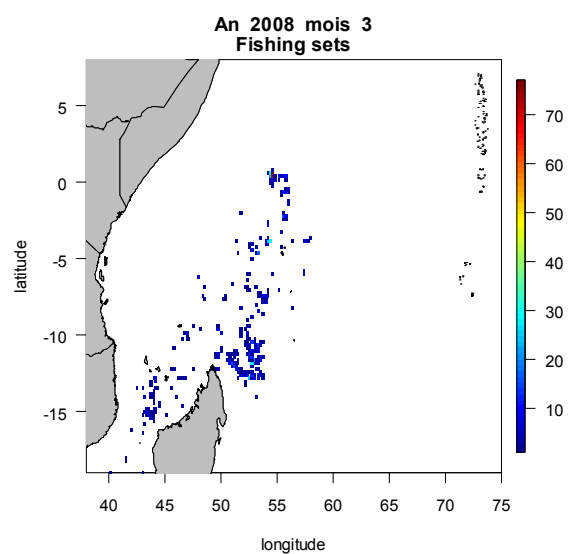
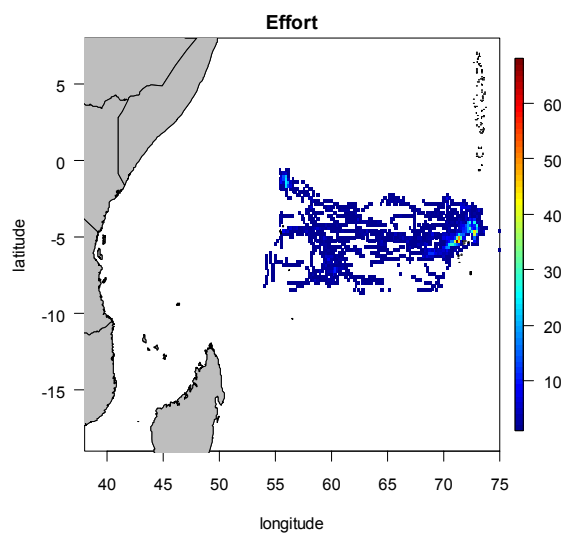
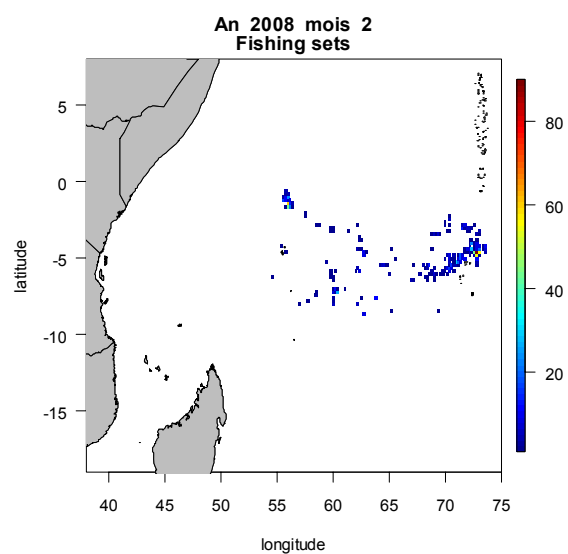
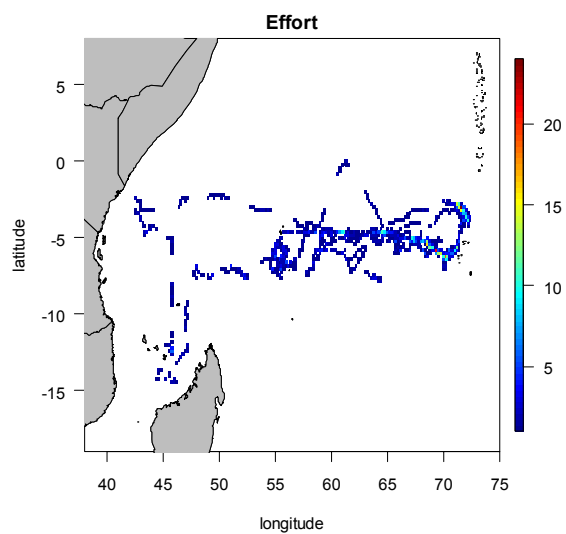
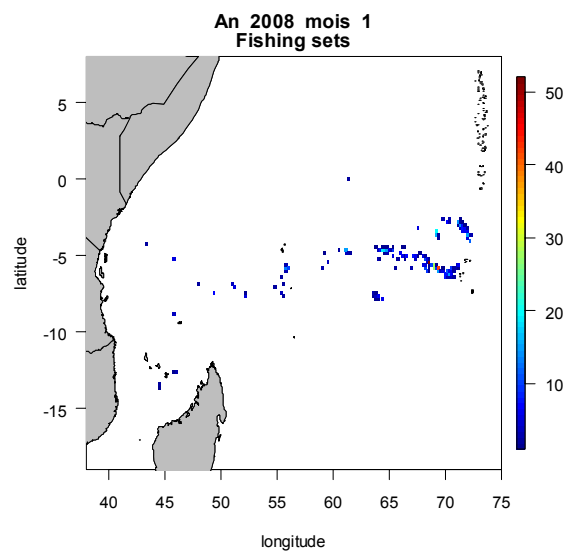


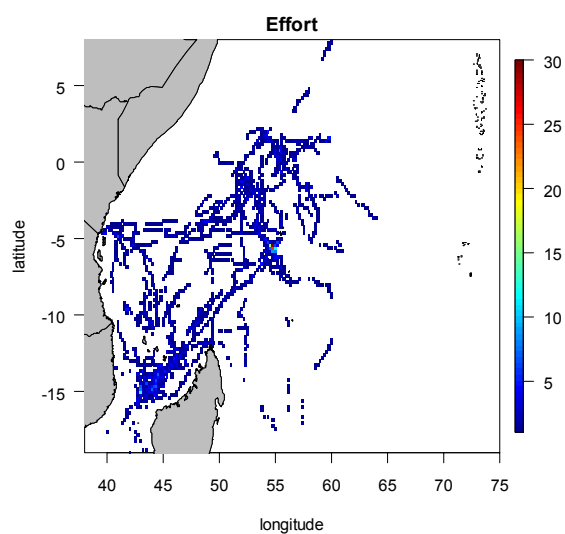
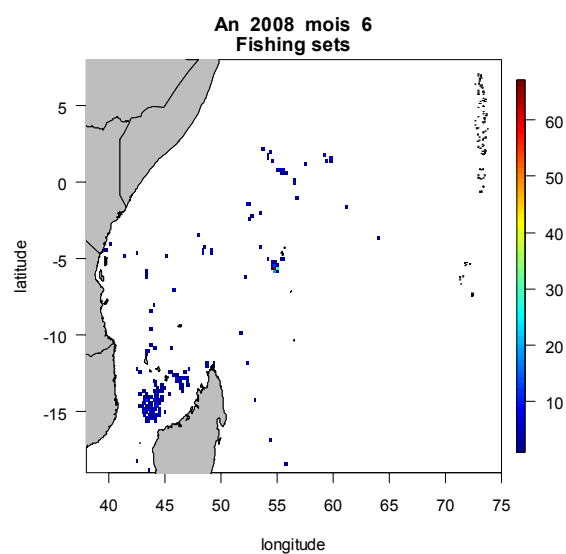
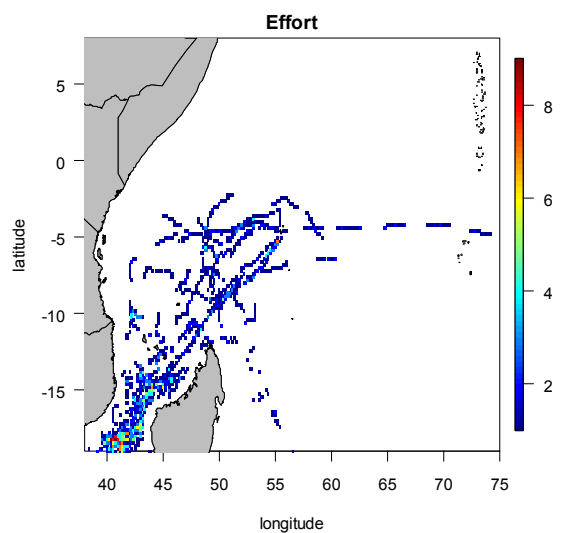
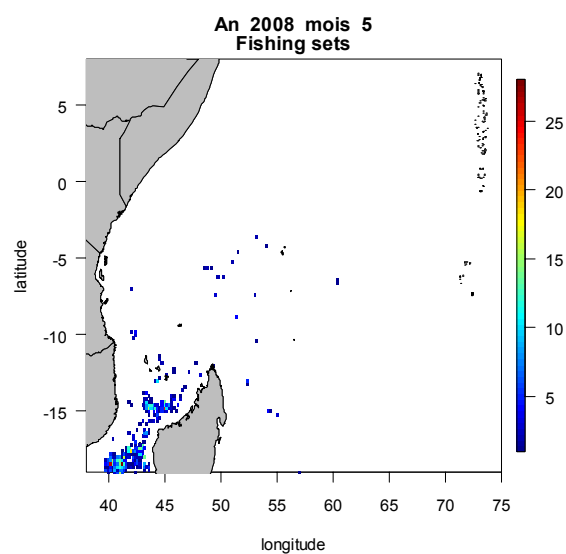
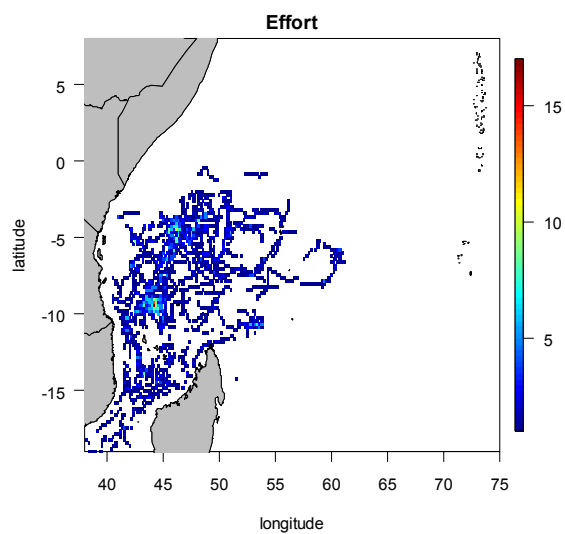
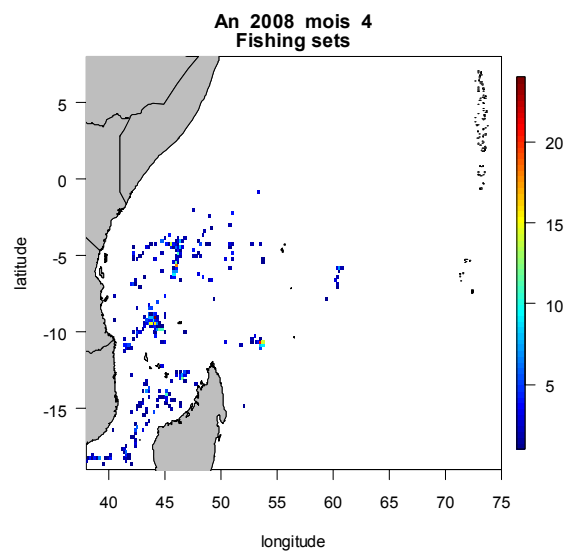


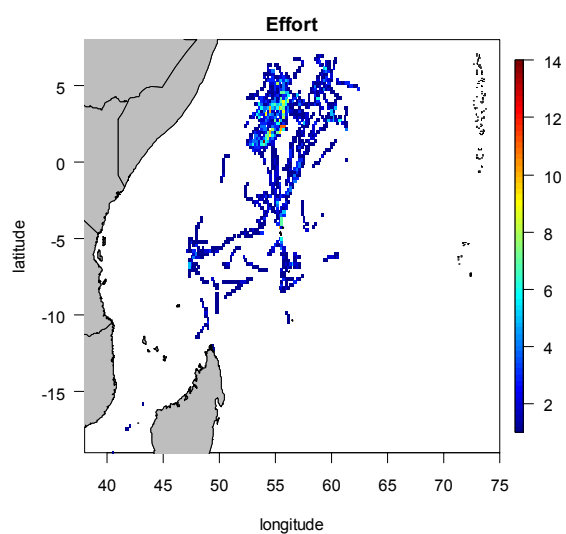
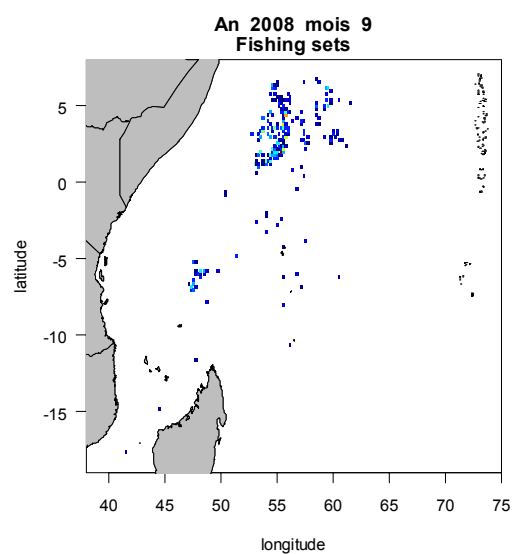
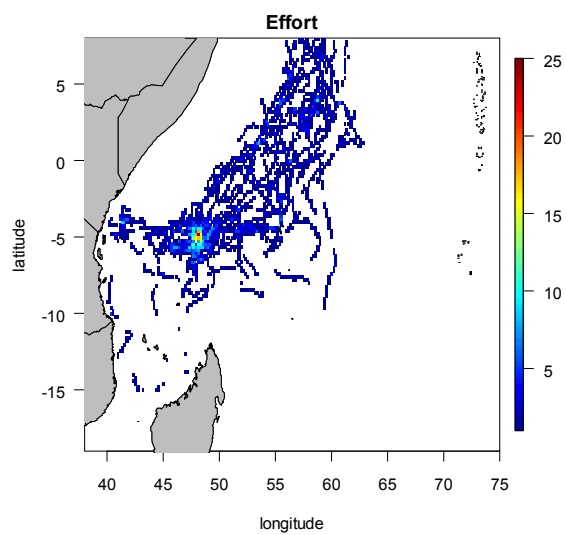
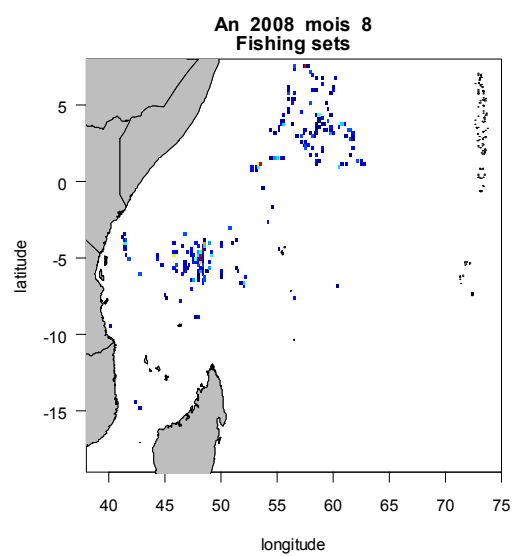
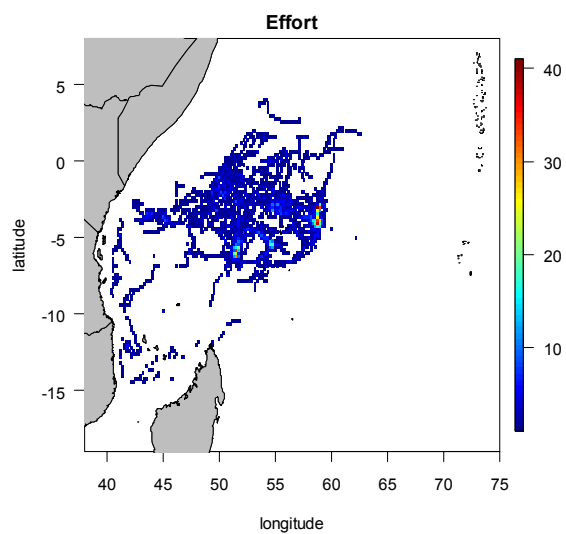
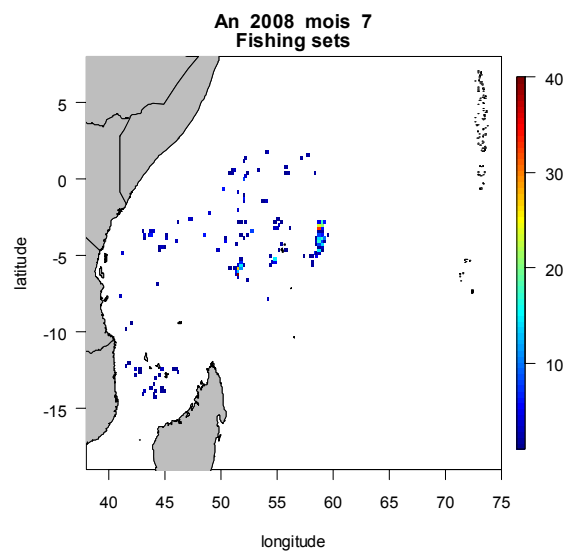




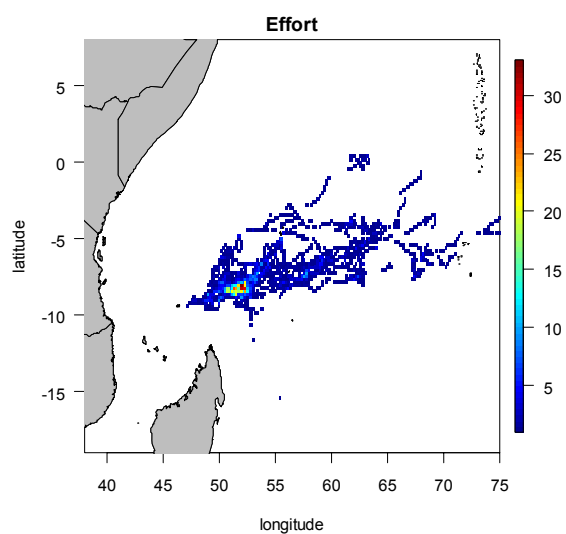
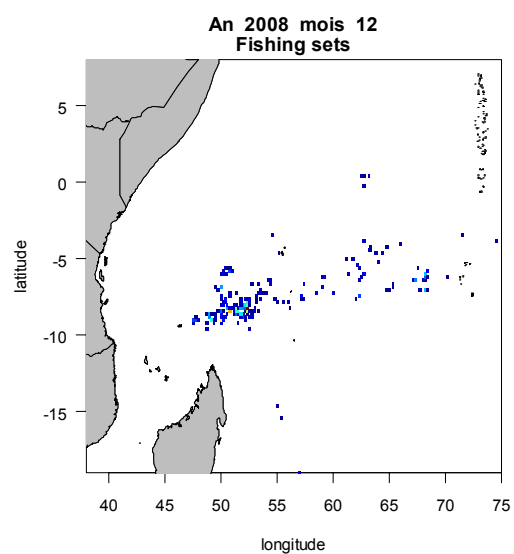
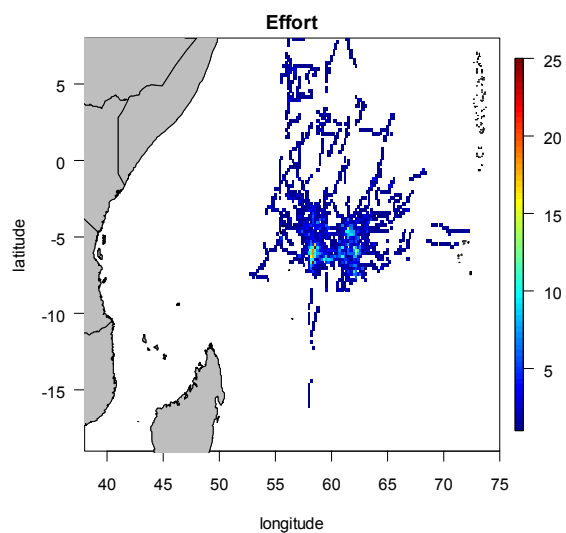
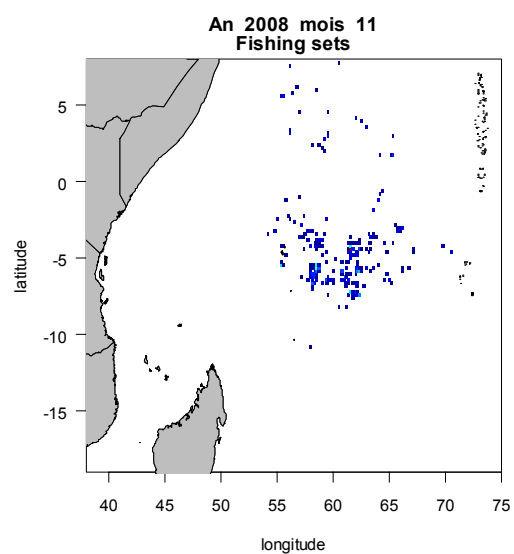
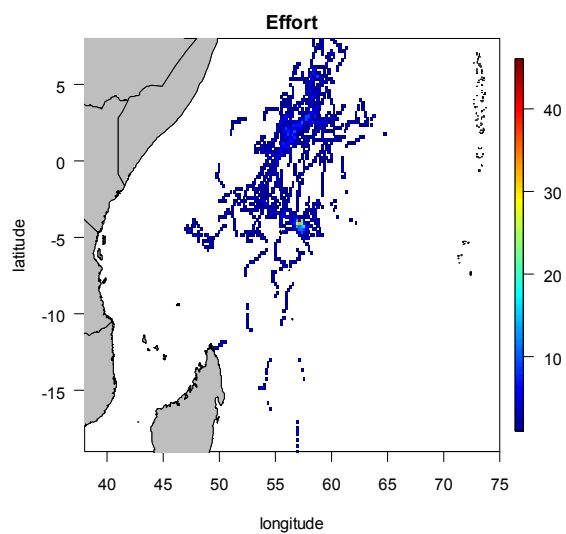
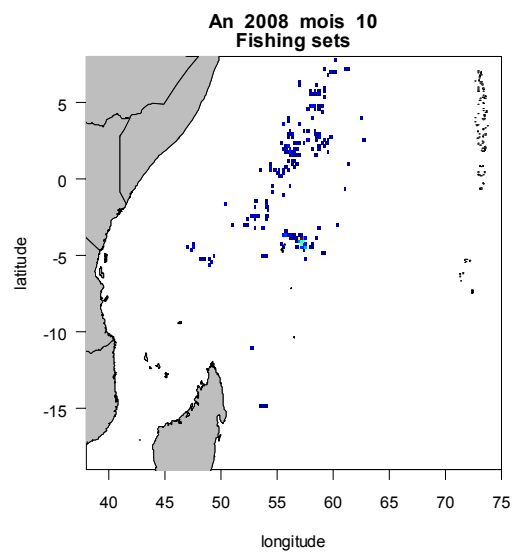




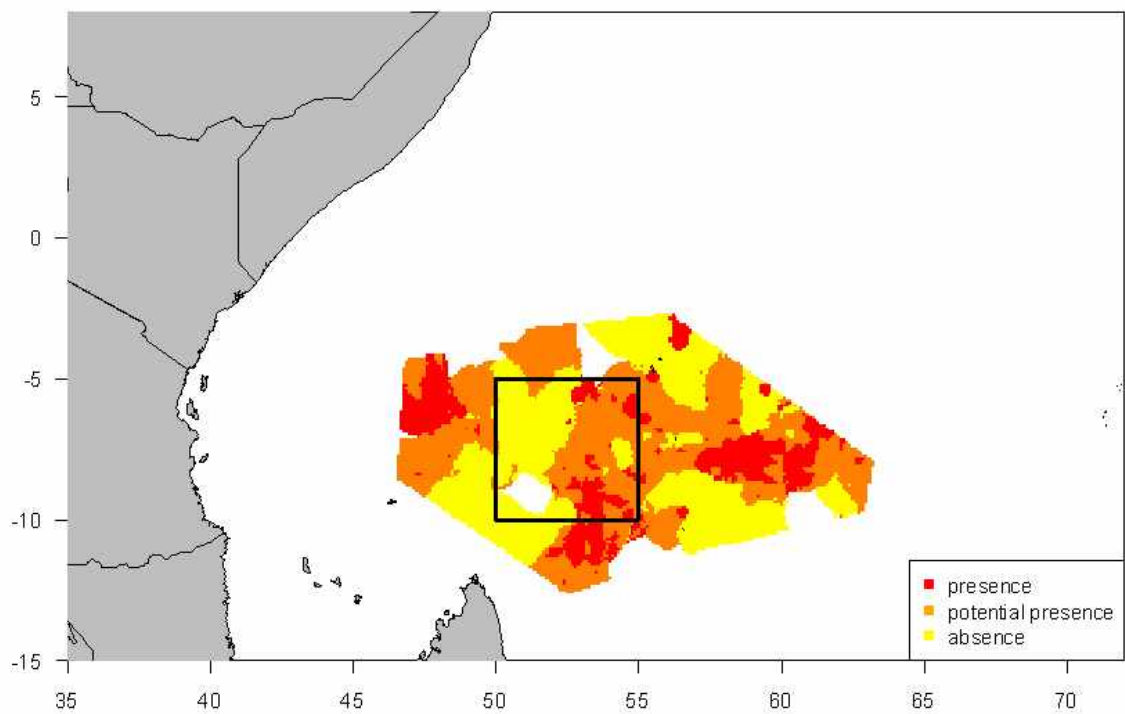
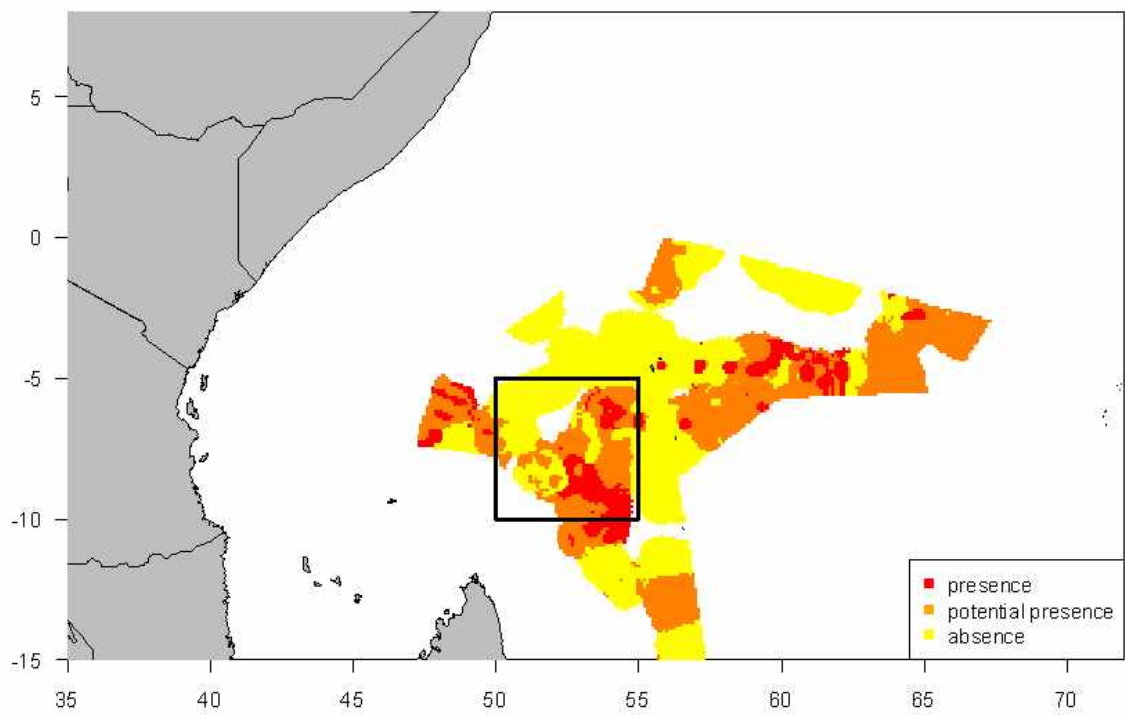


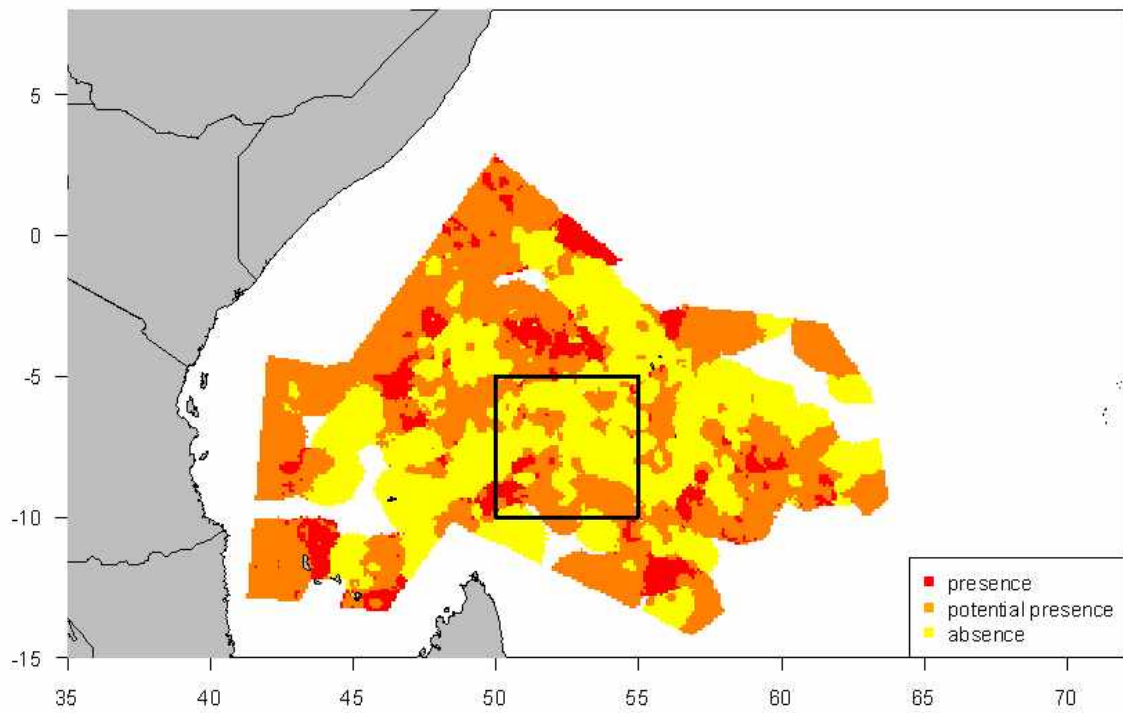




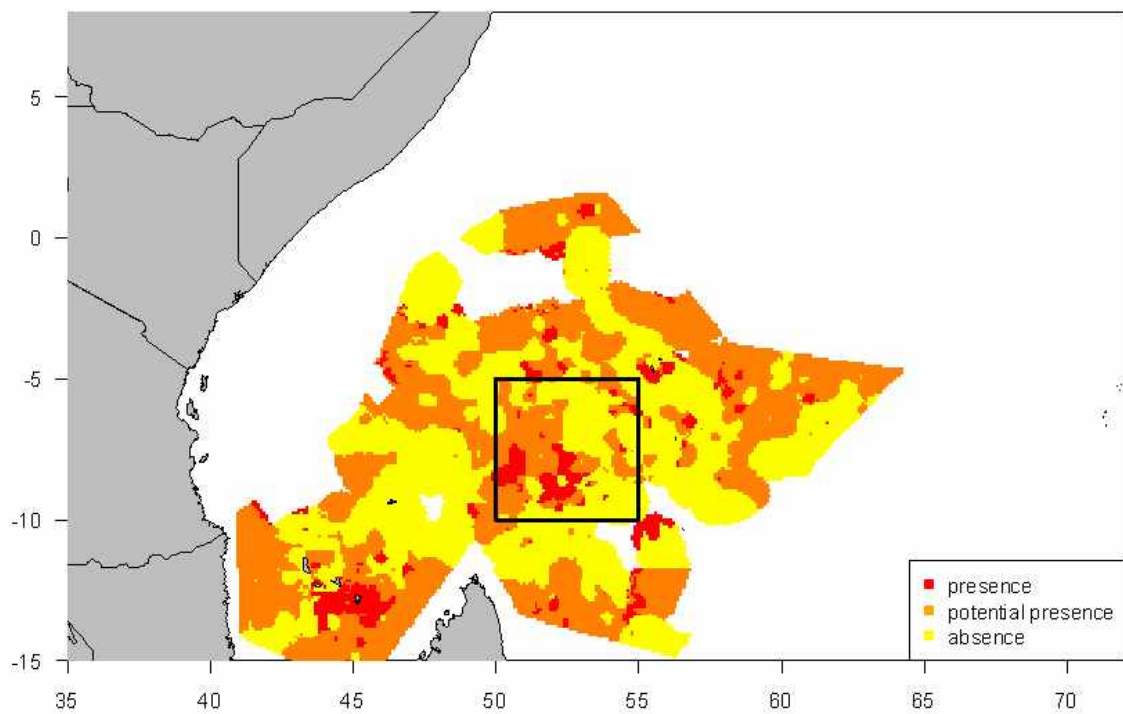


## **Annexe 5 : Atlas des cartes de proxy de présence de thon**

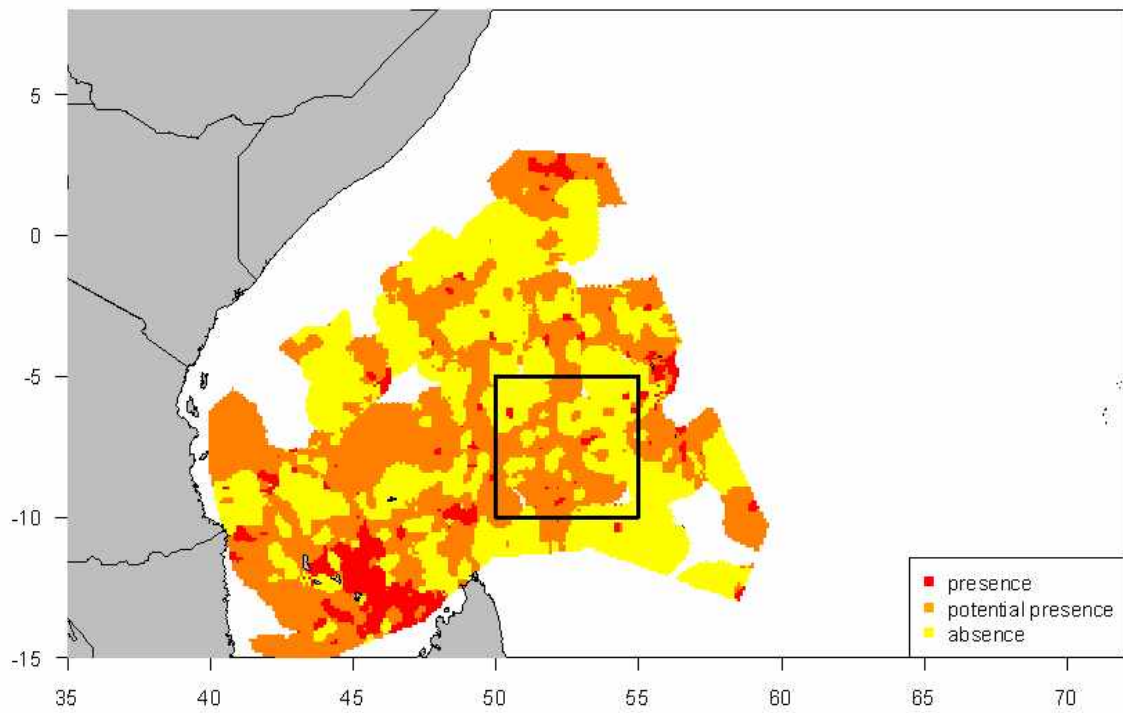




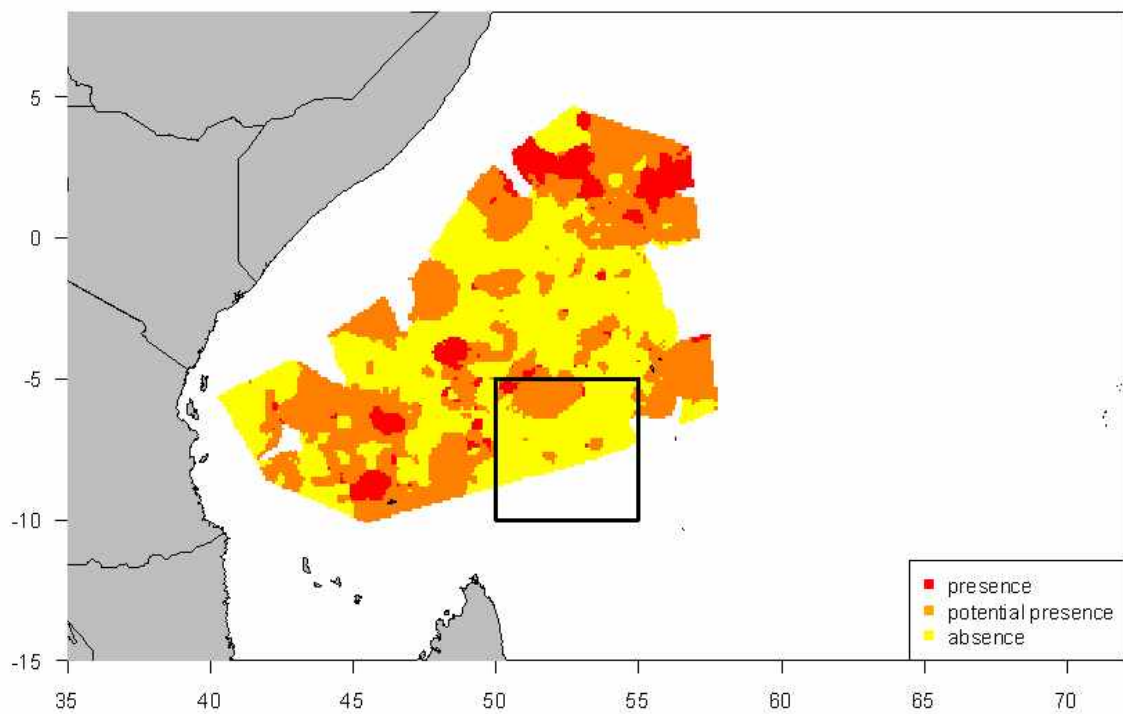
3/2006



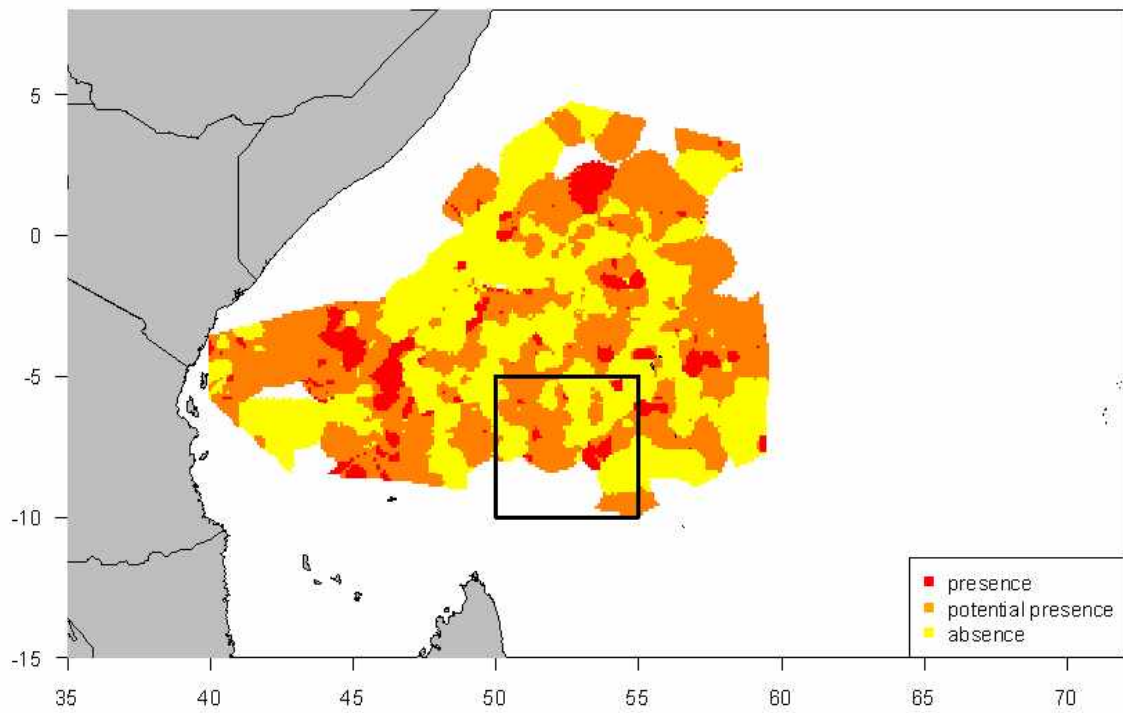
4/2006



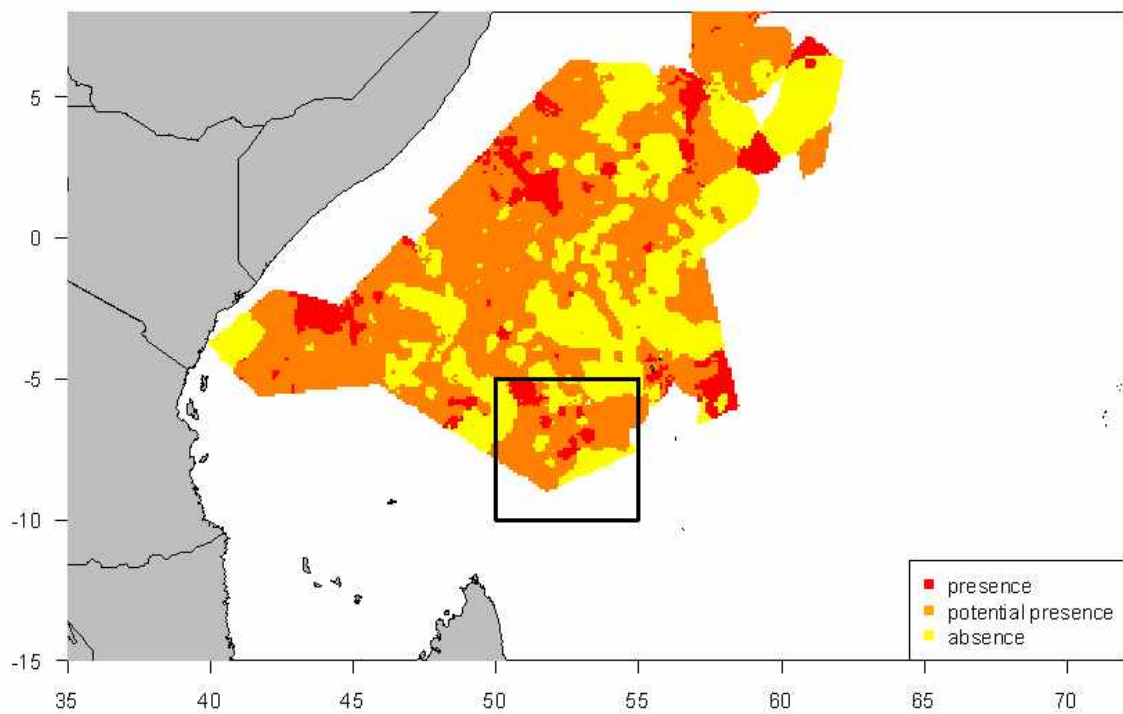
5/2006



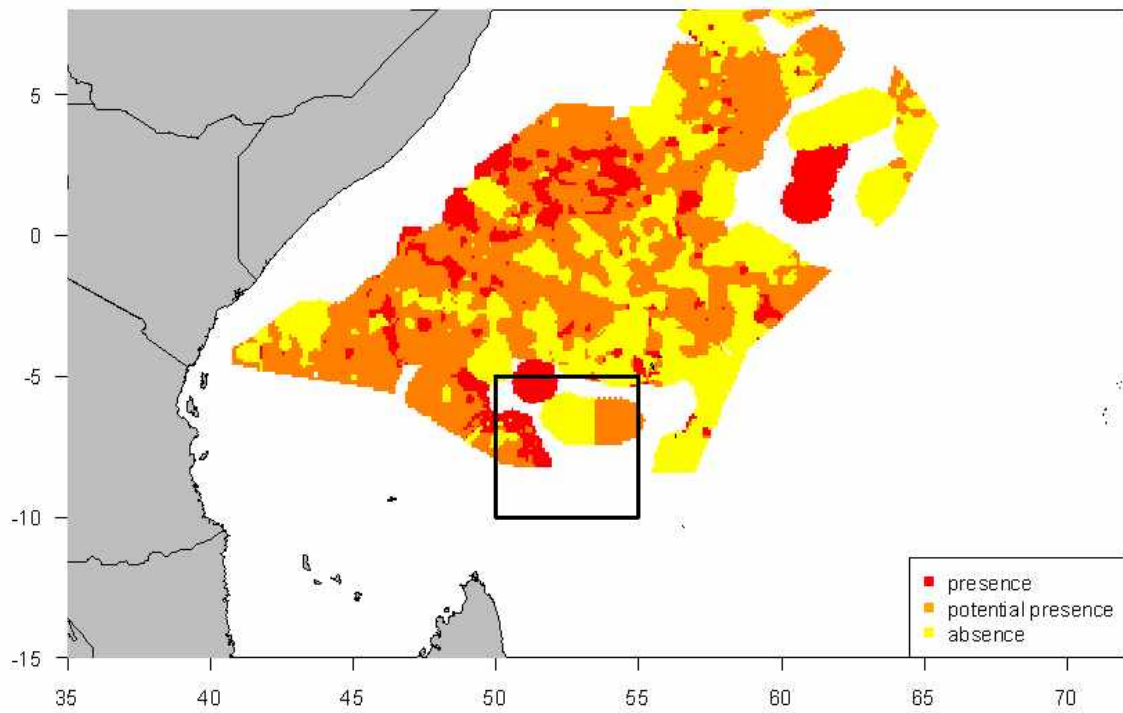
6/2006



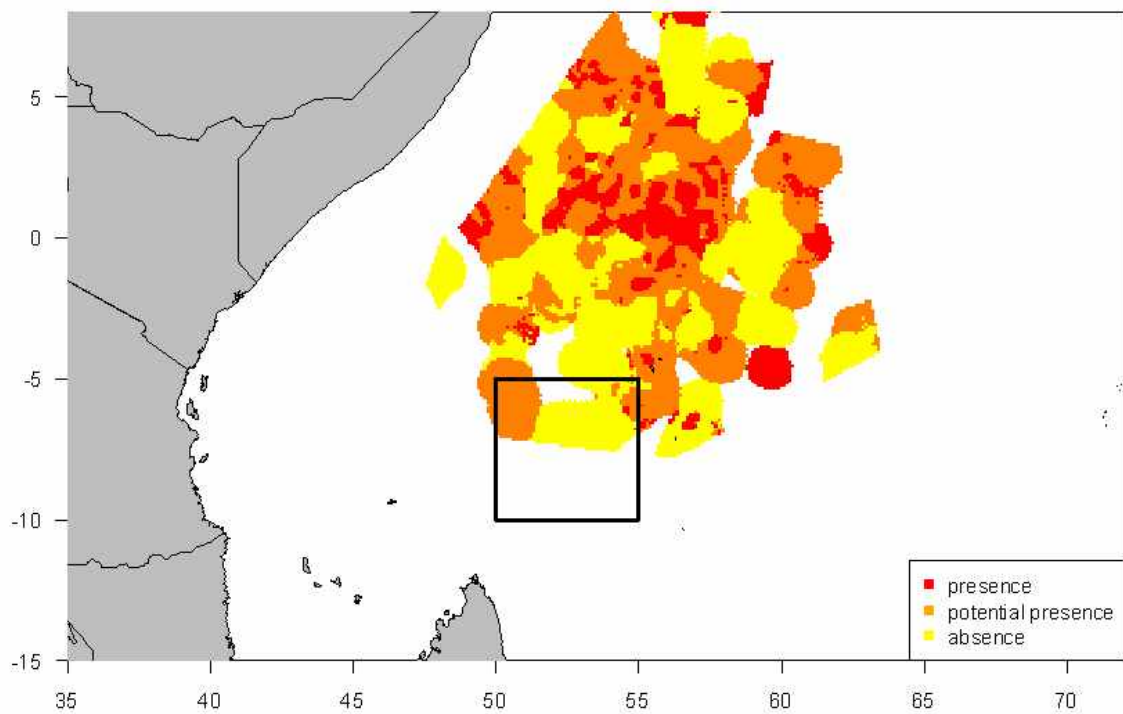
7/2006



8/2006

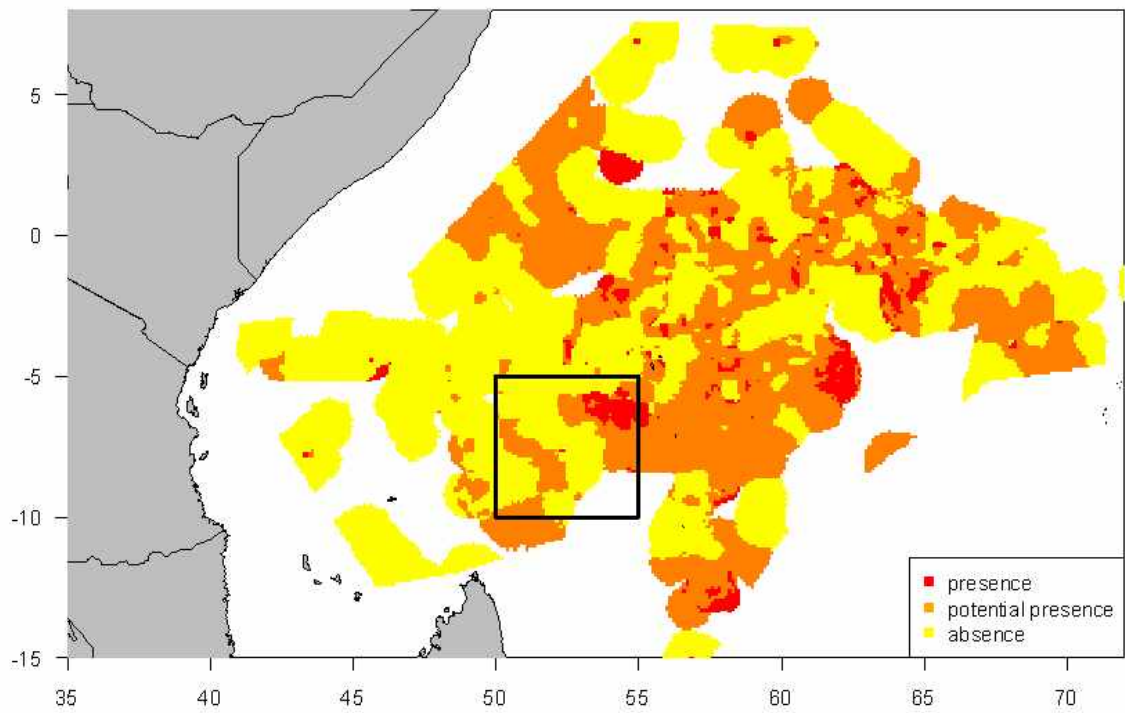


9/2006

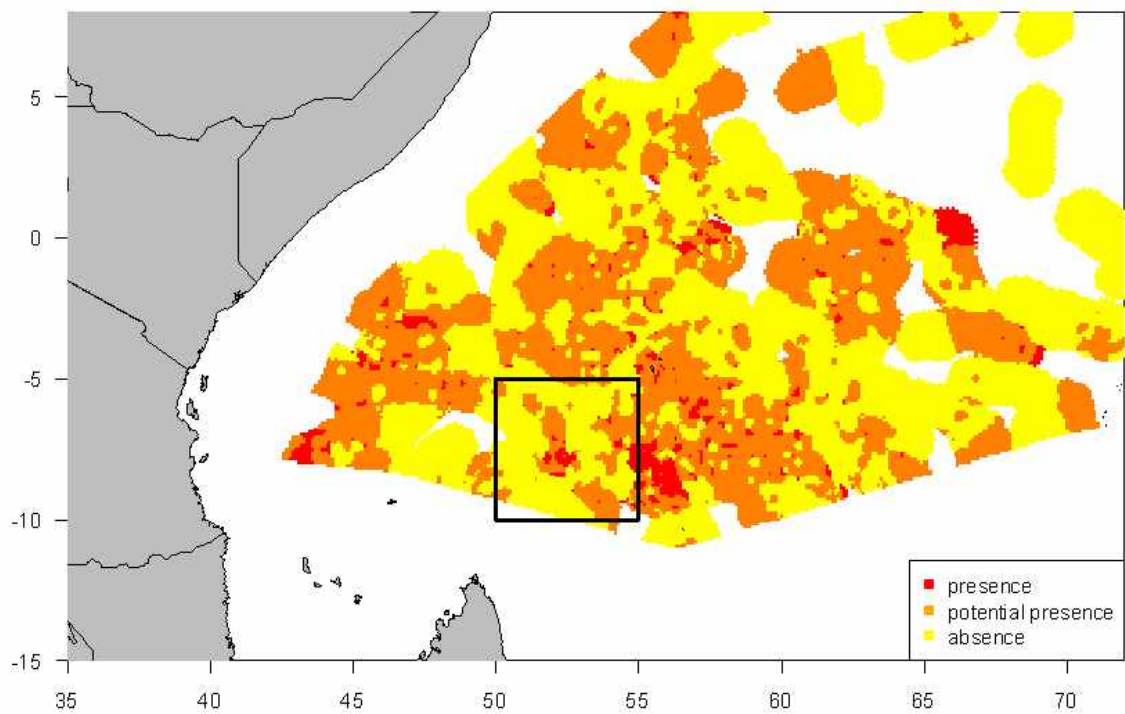


10/2006



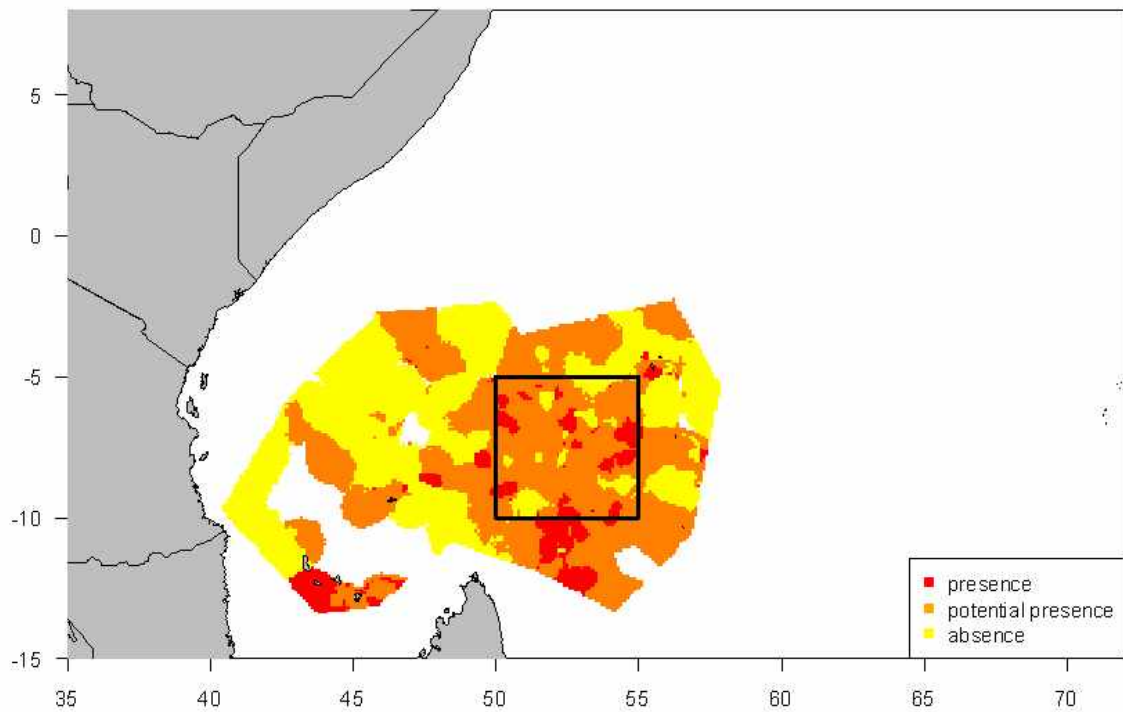
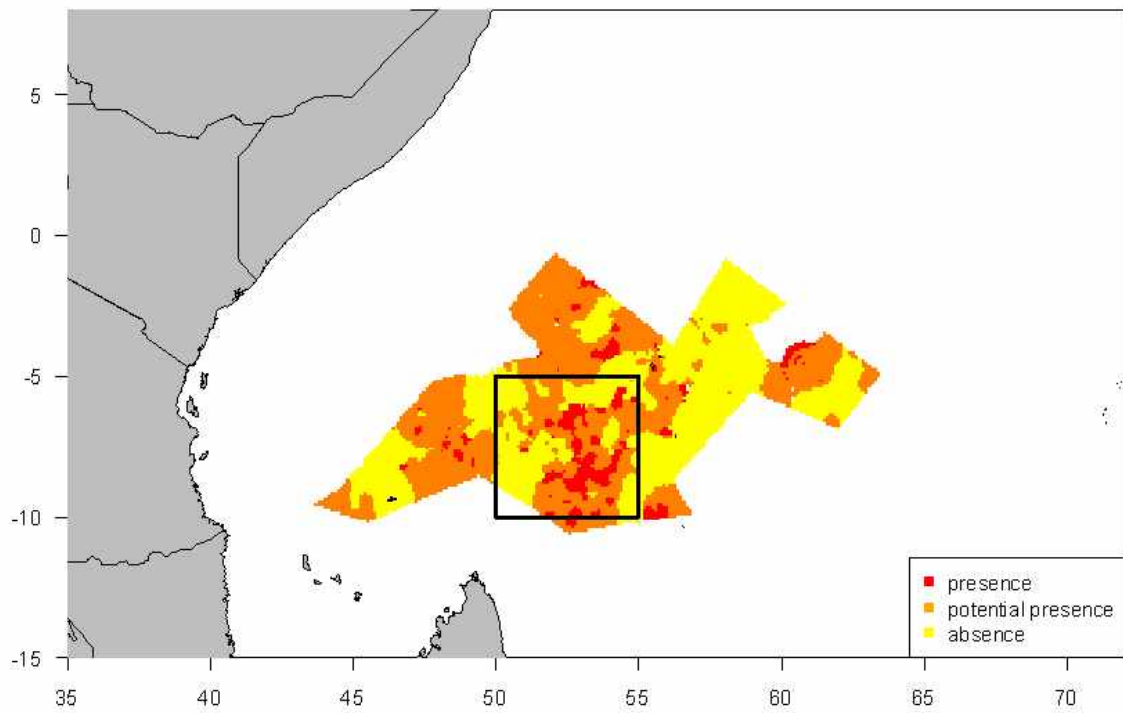


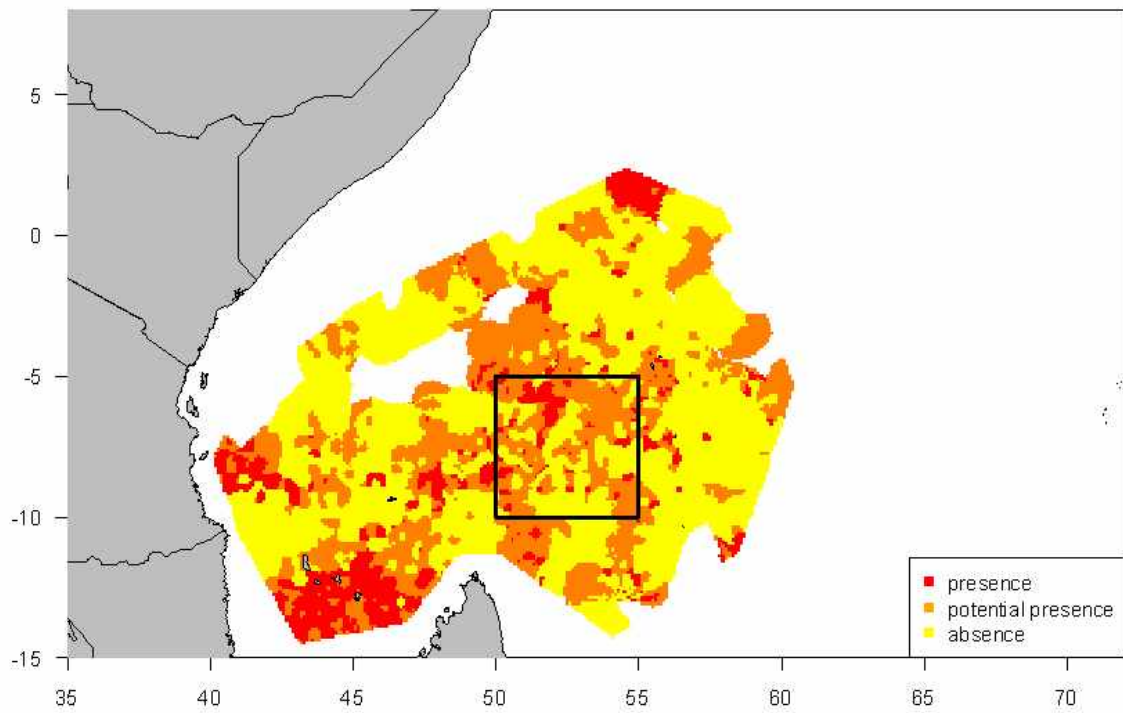
11/2006



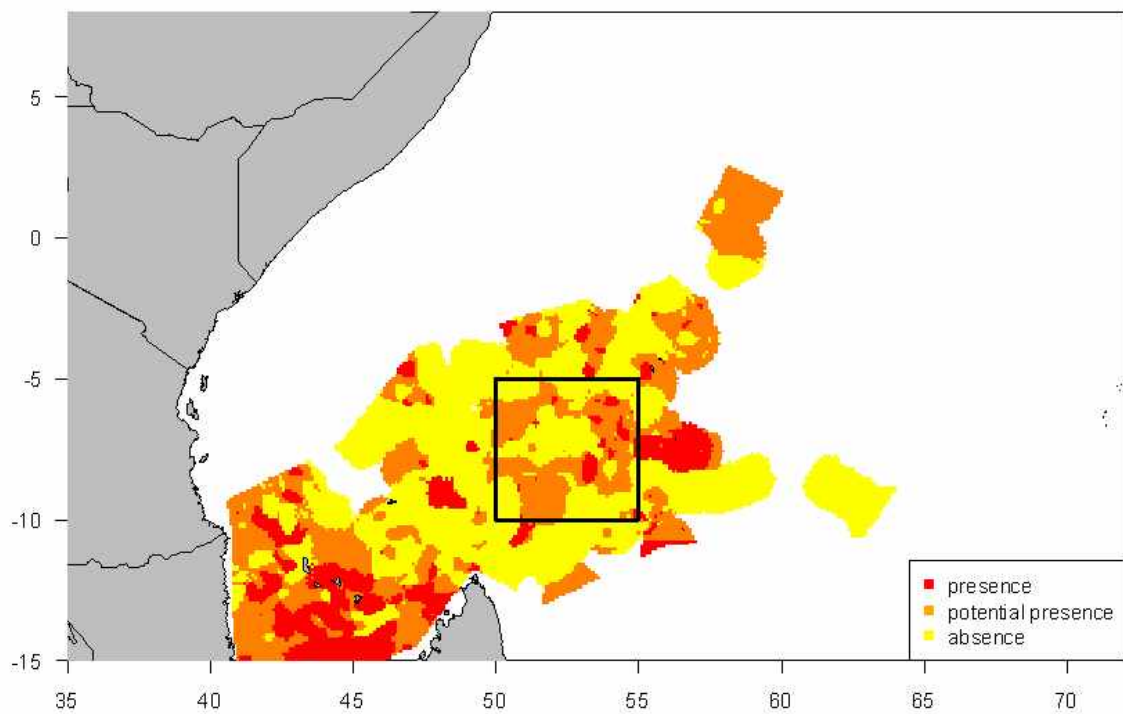
12/2006



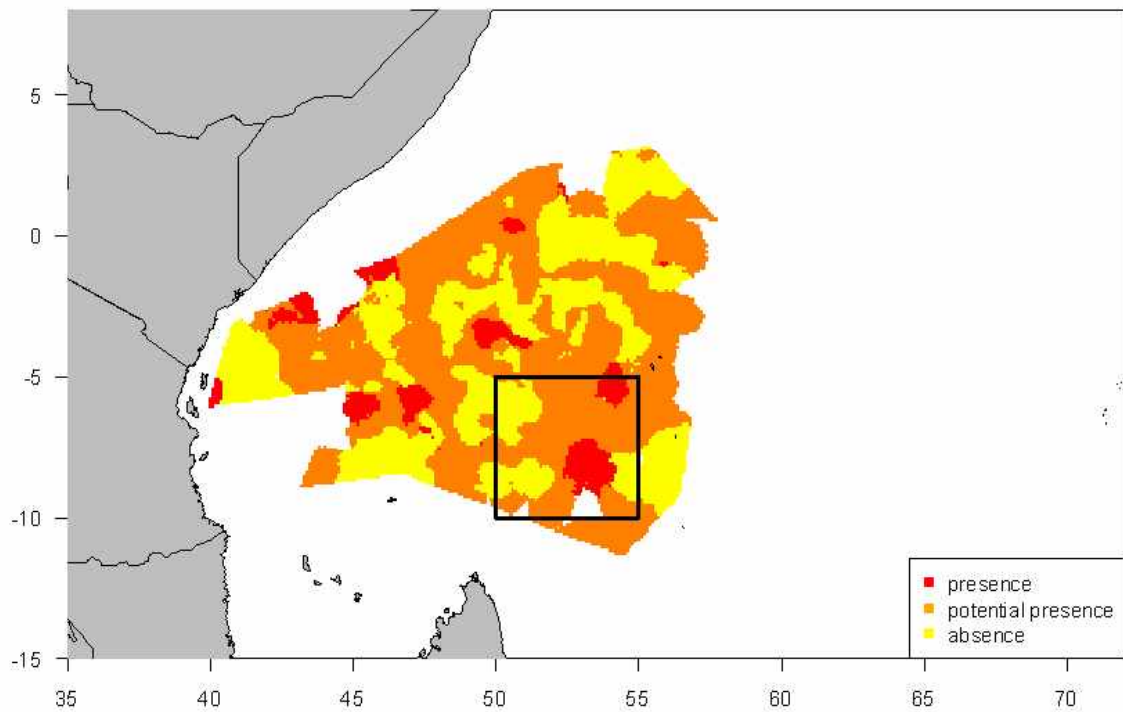
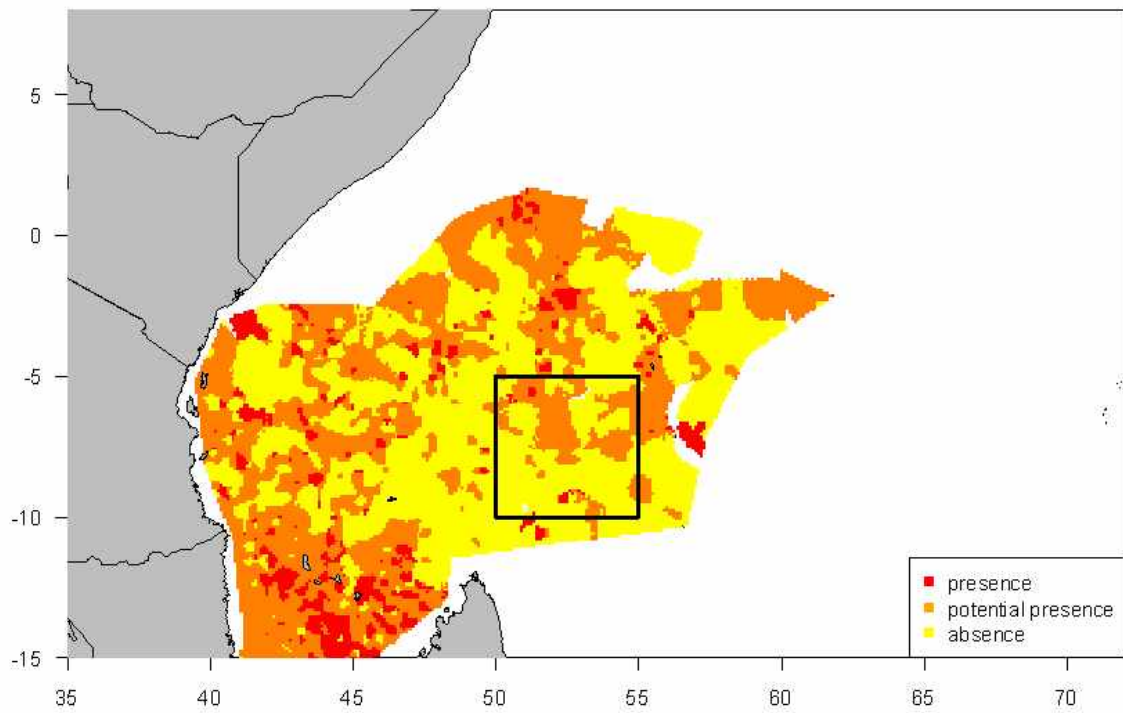


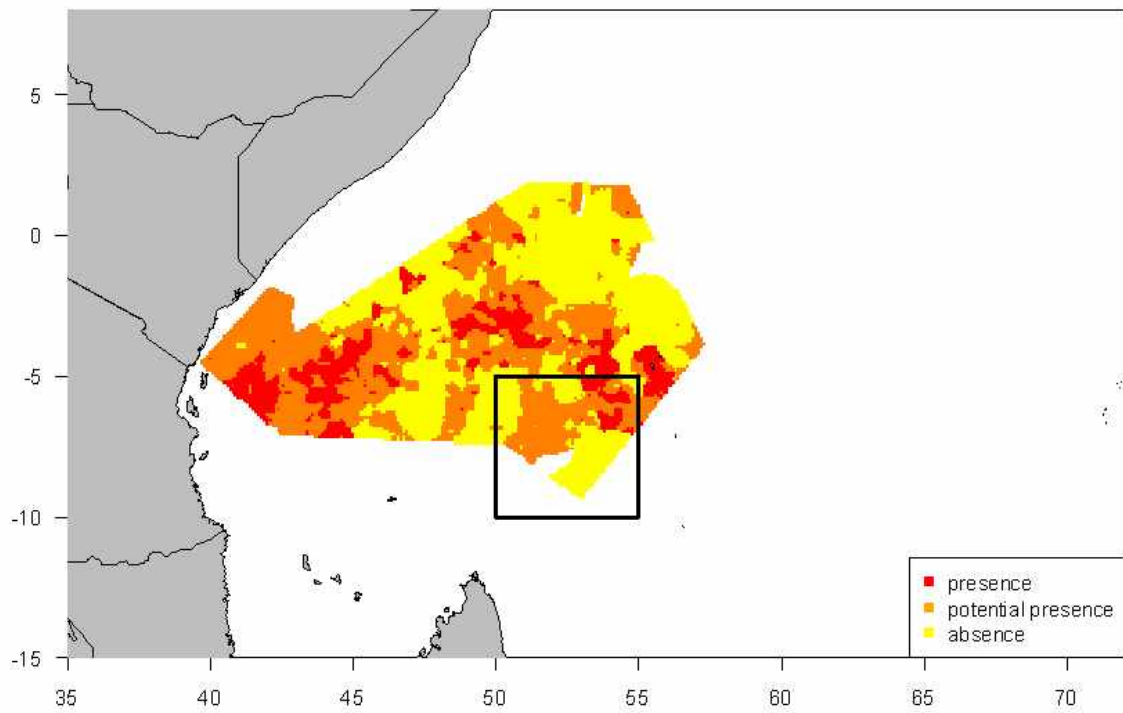


3/2007

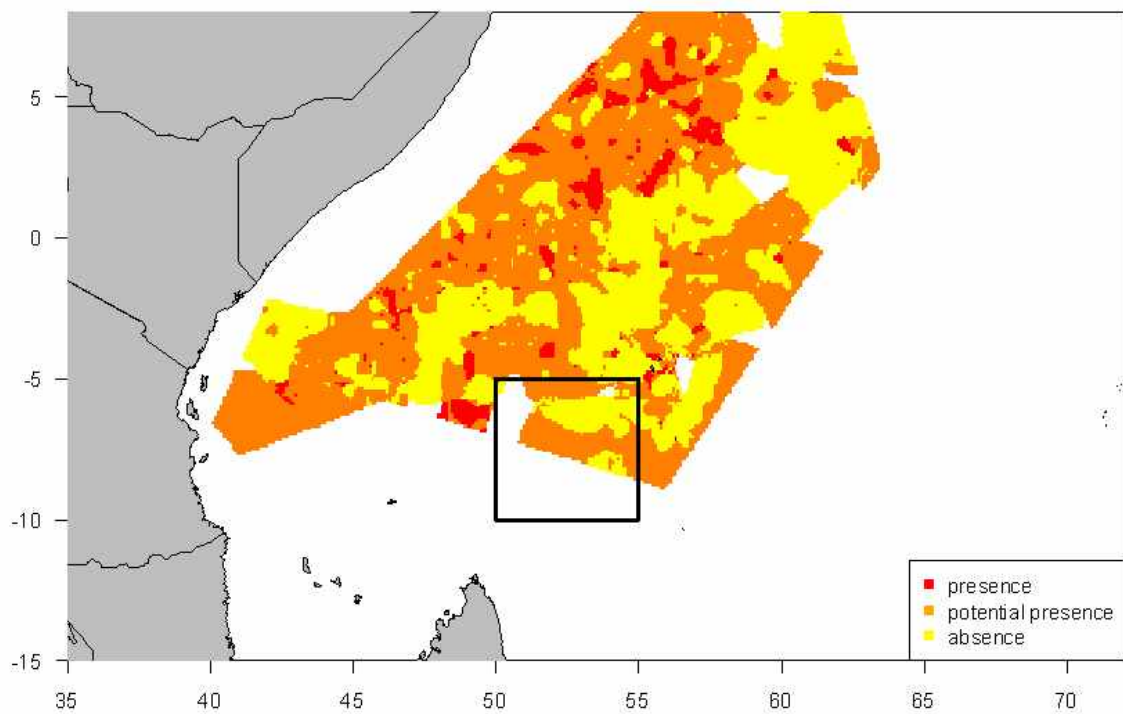


4/2007

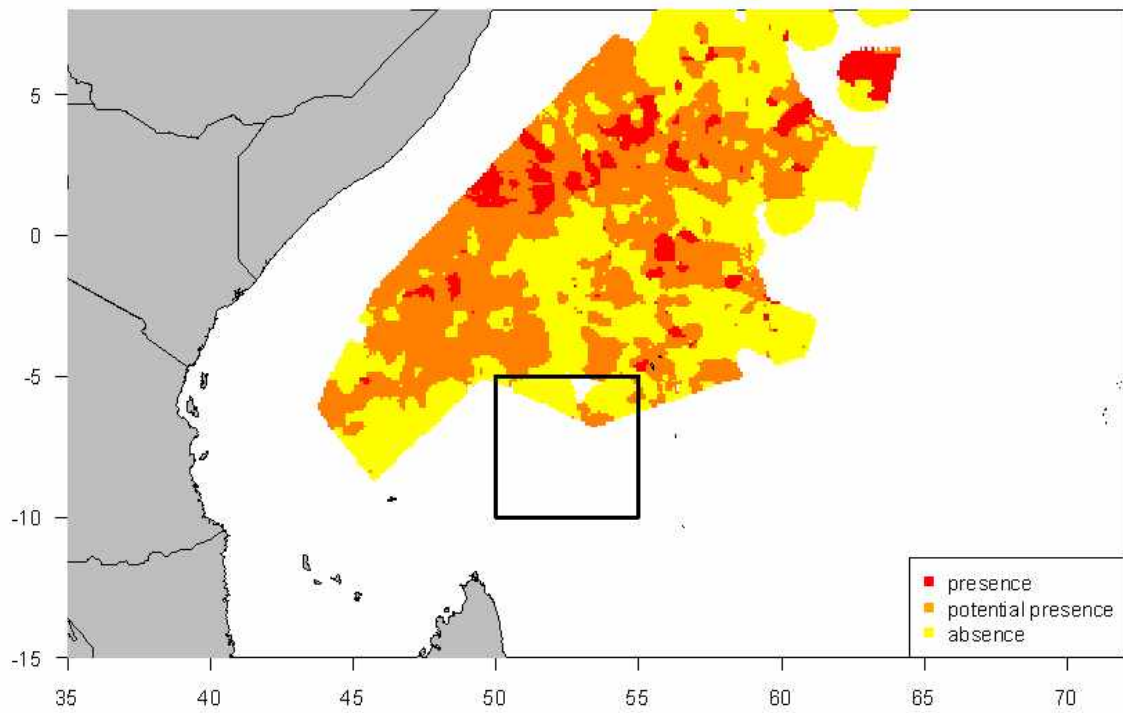




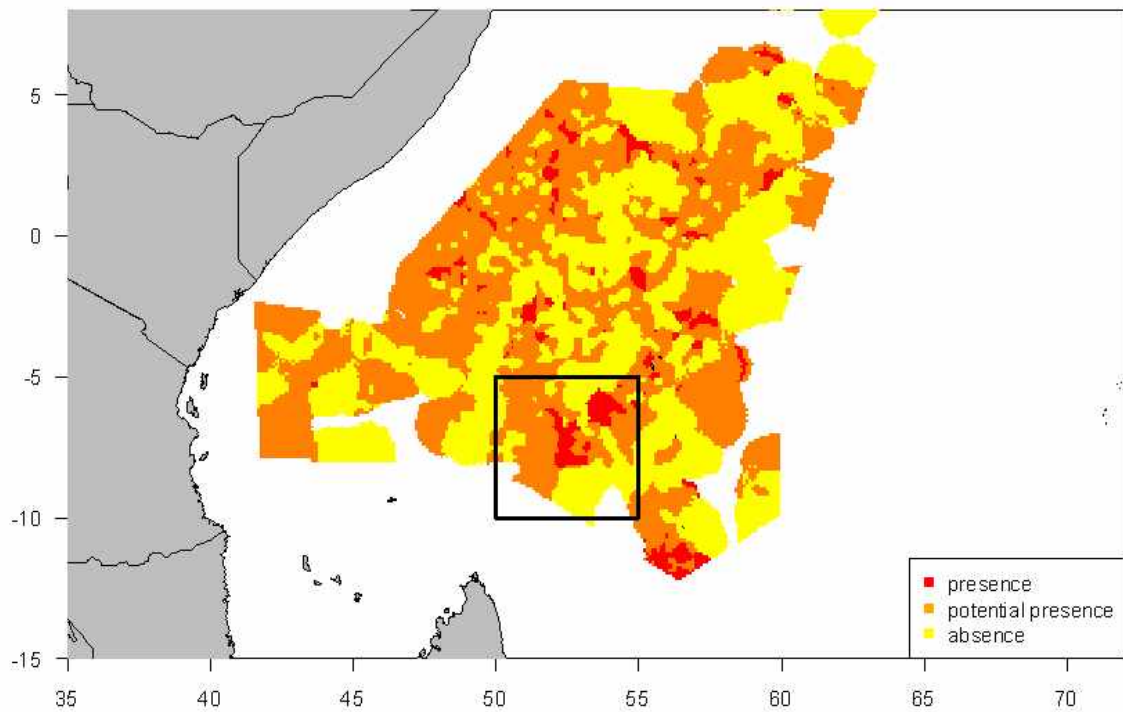
7/2007



8/2007

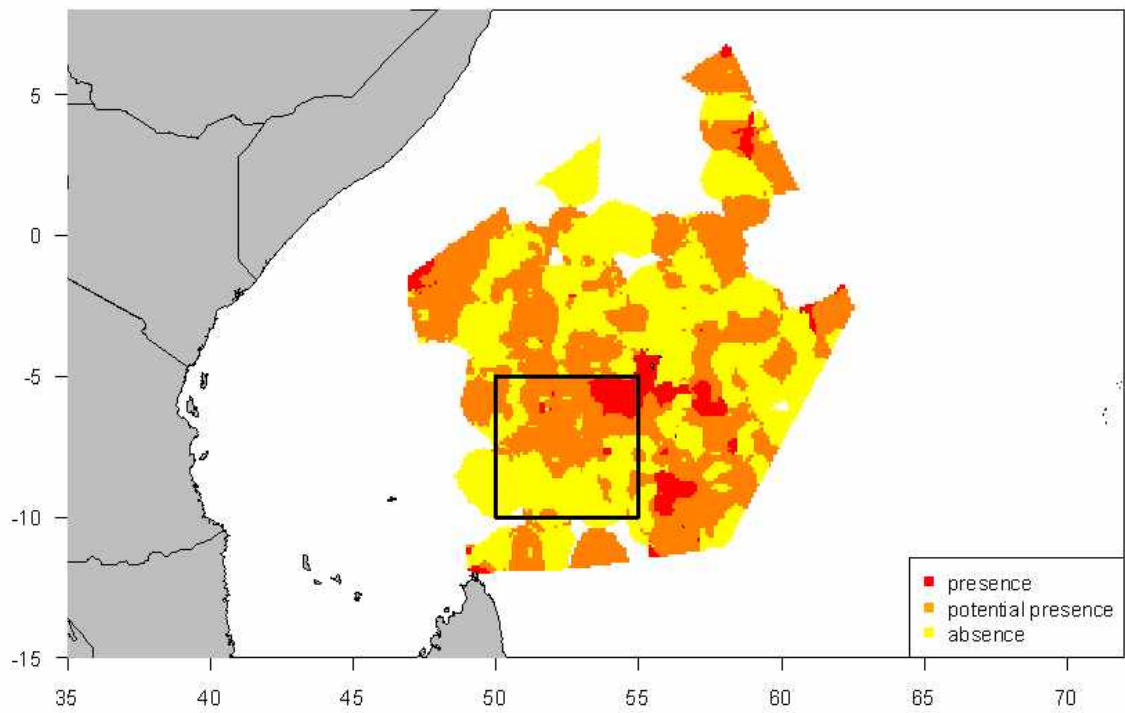


9/2007

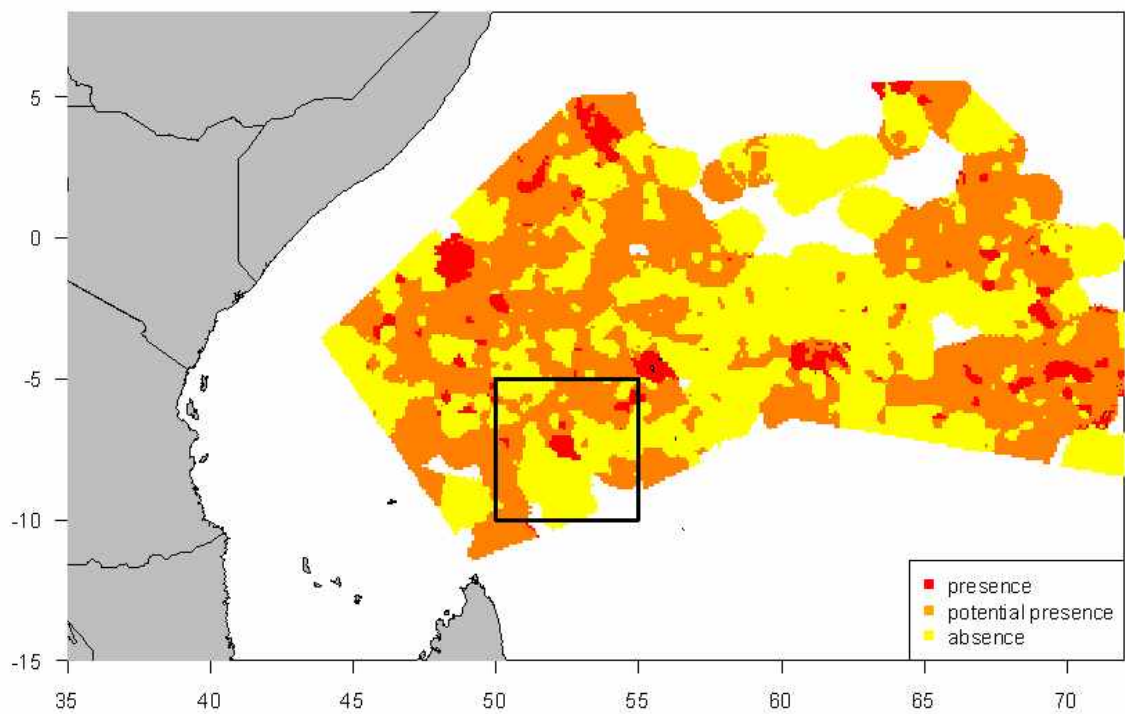


10/2007

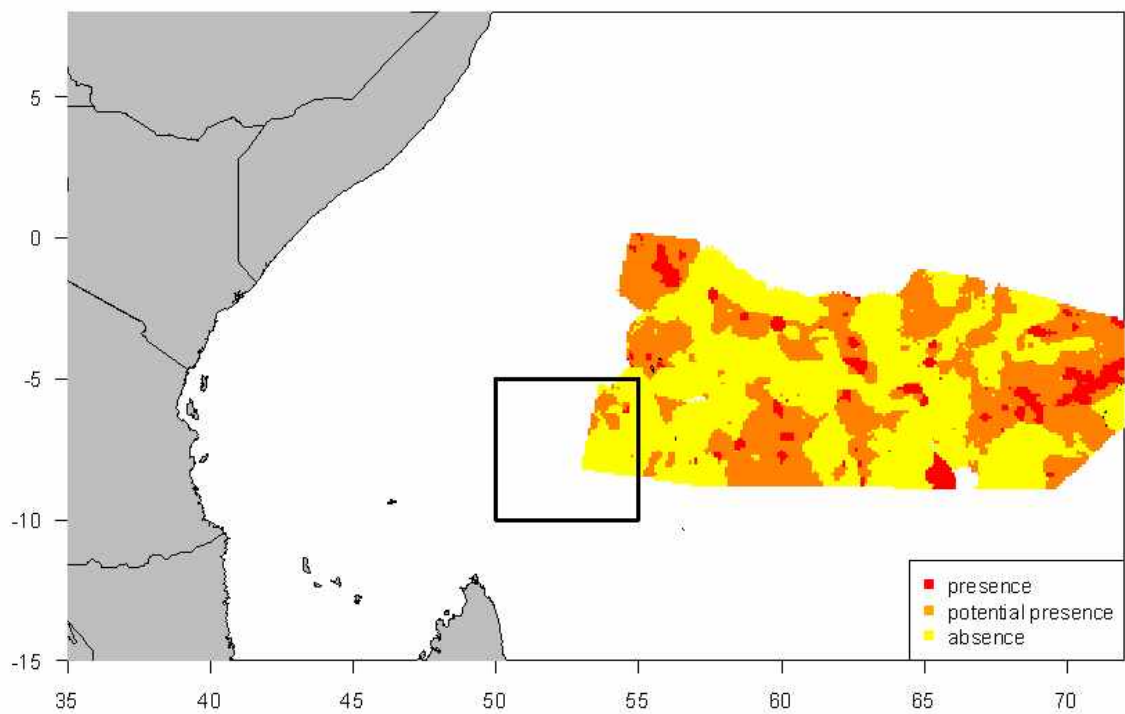
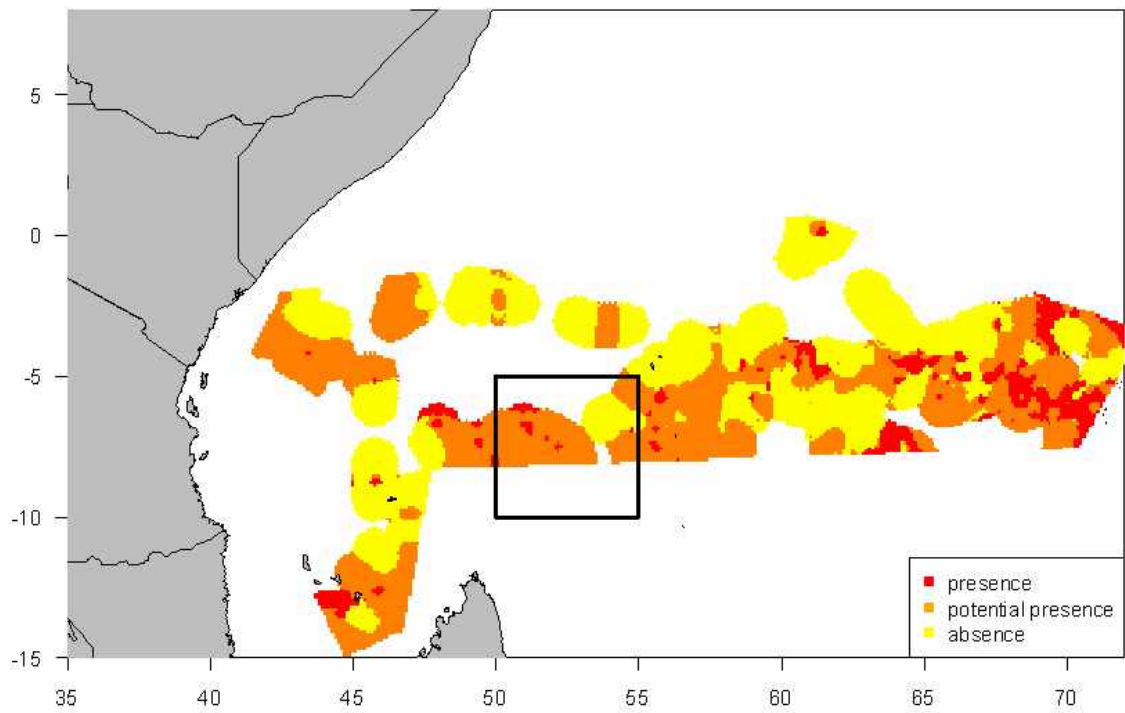


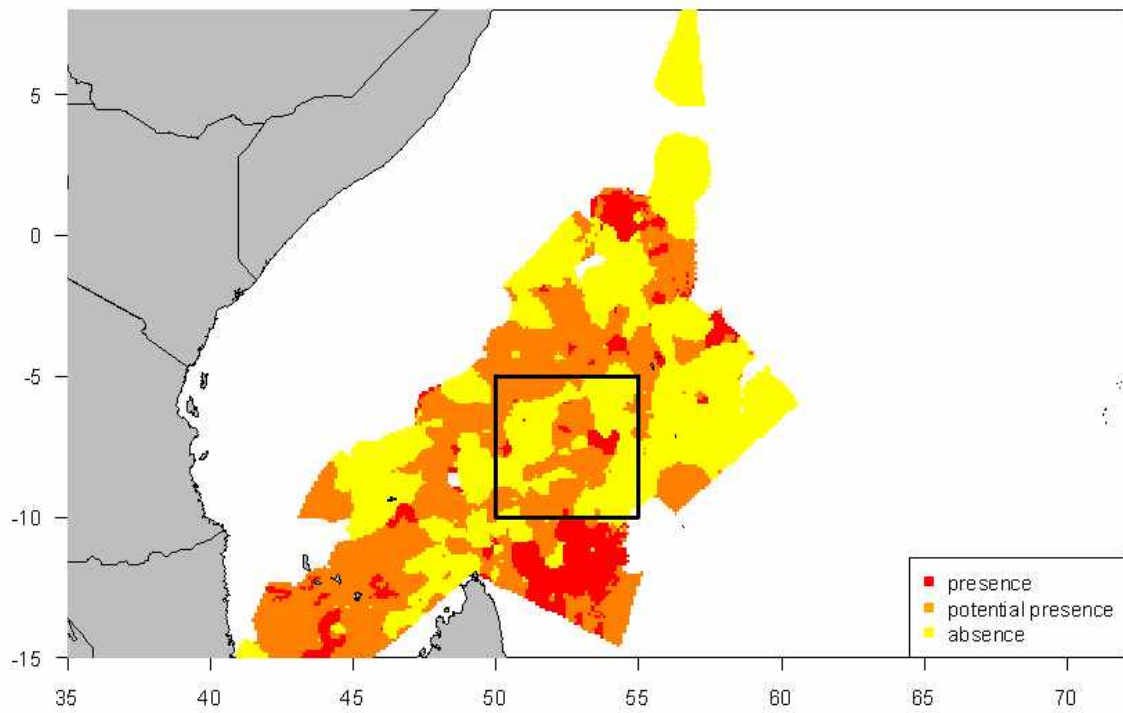


11/2007

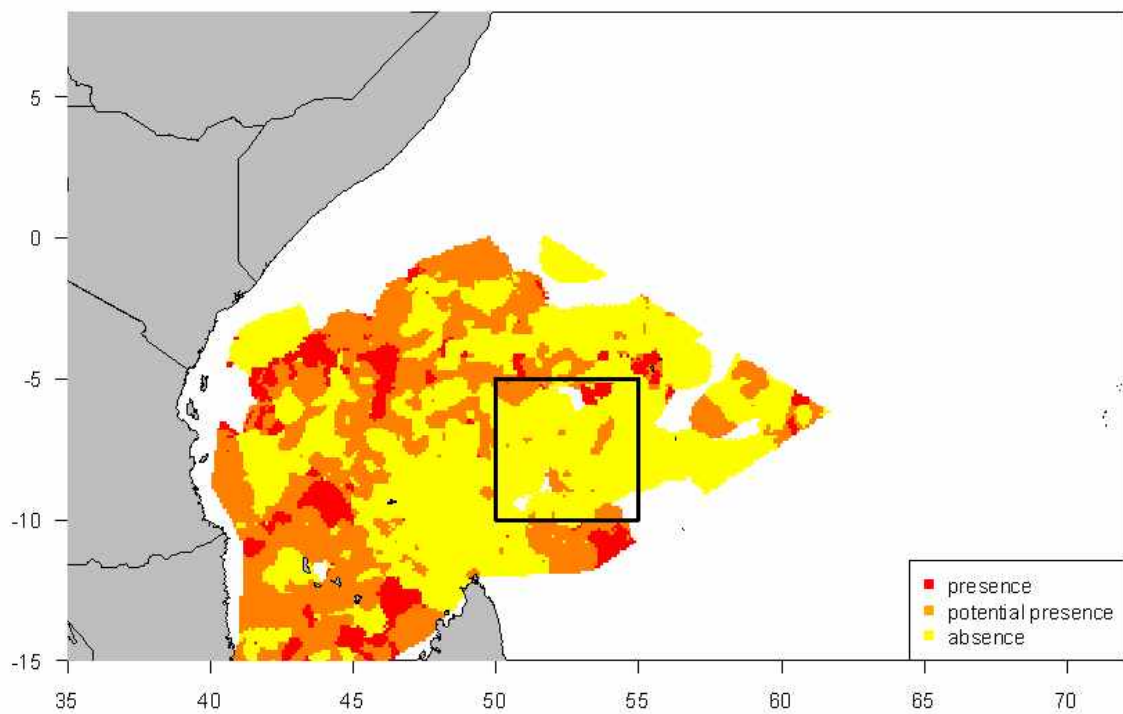


12/2007



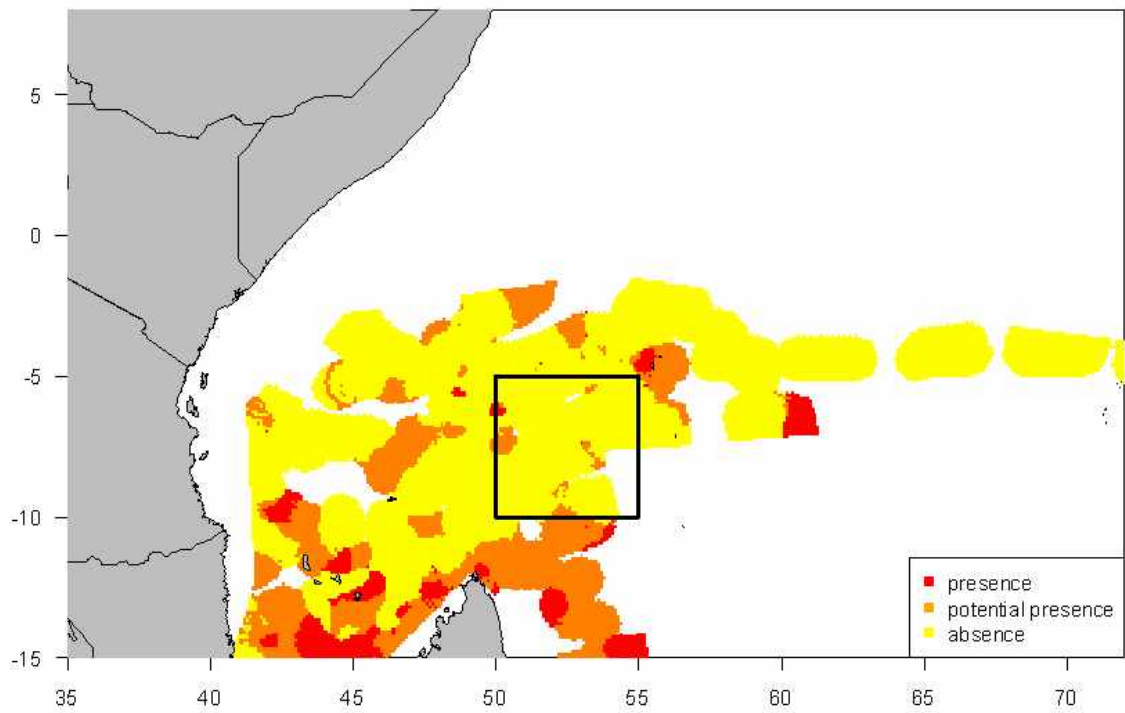


3/2008

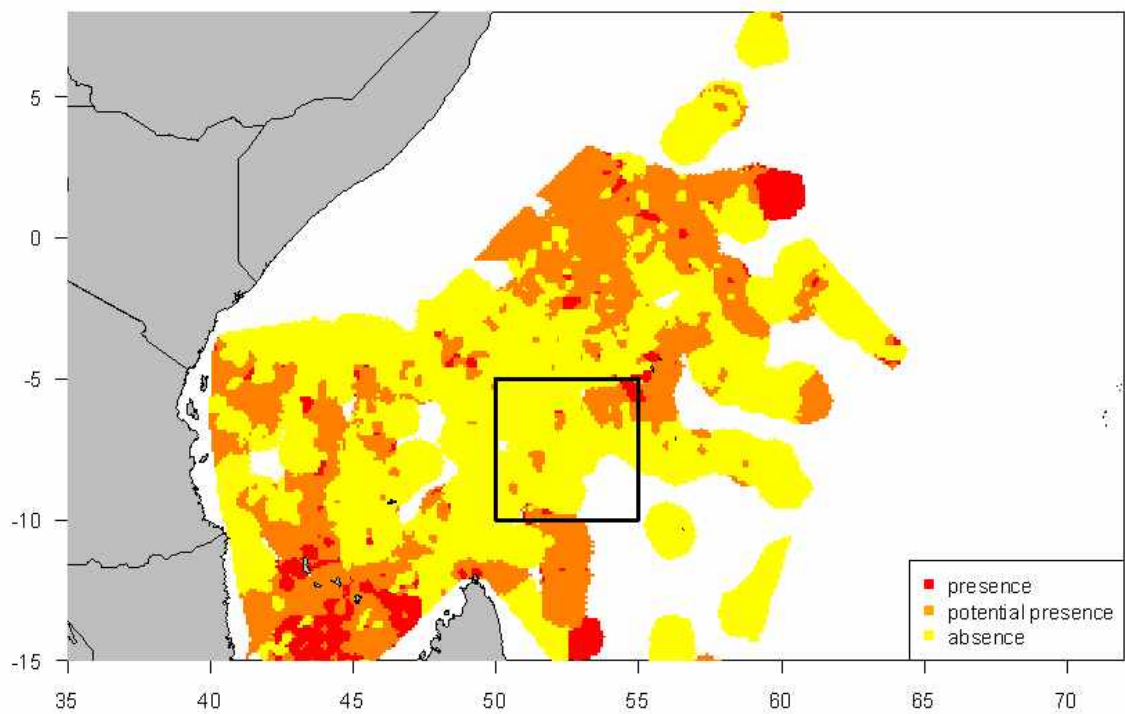


4/2008

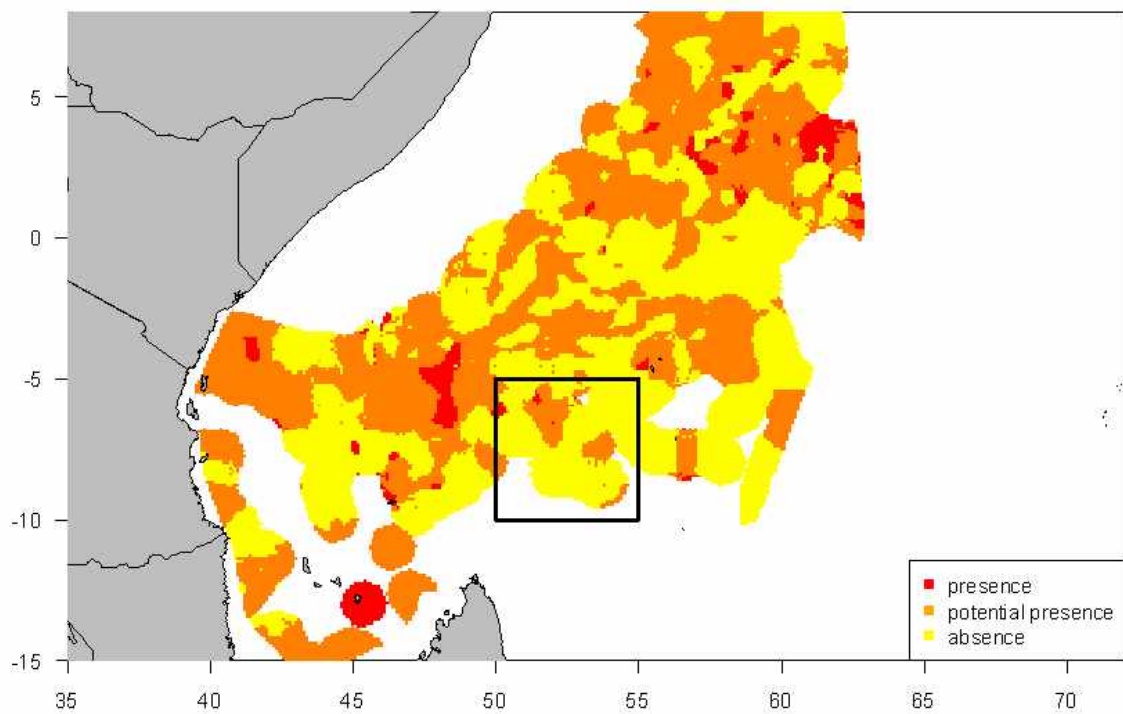
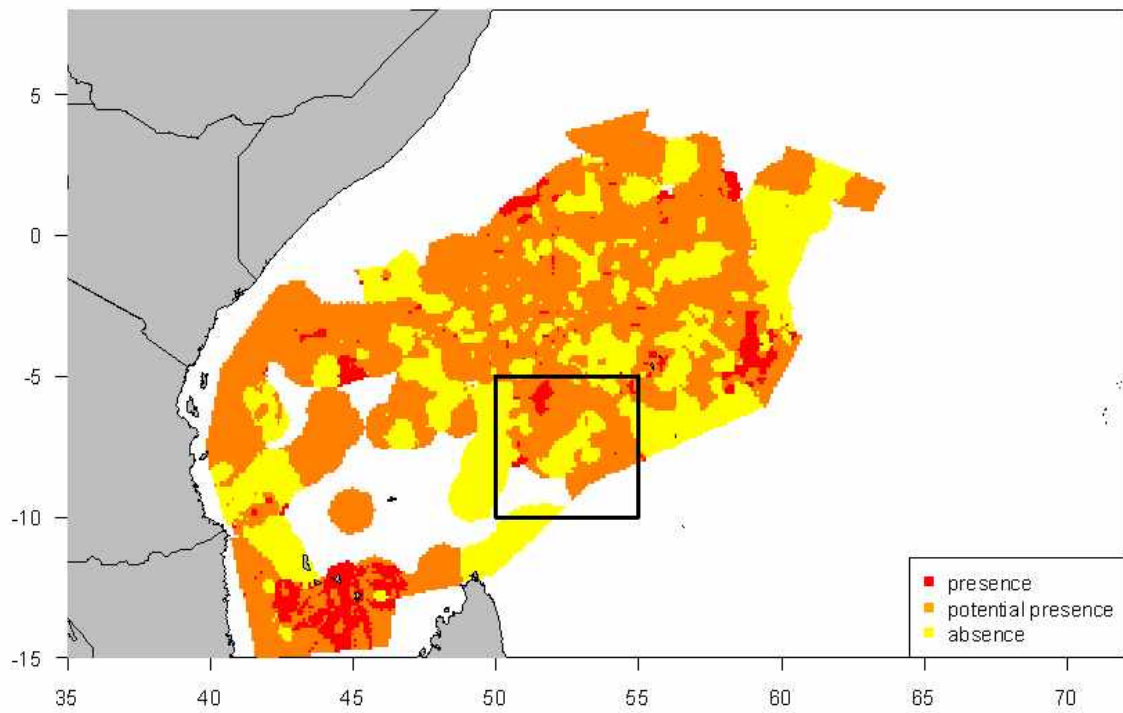


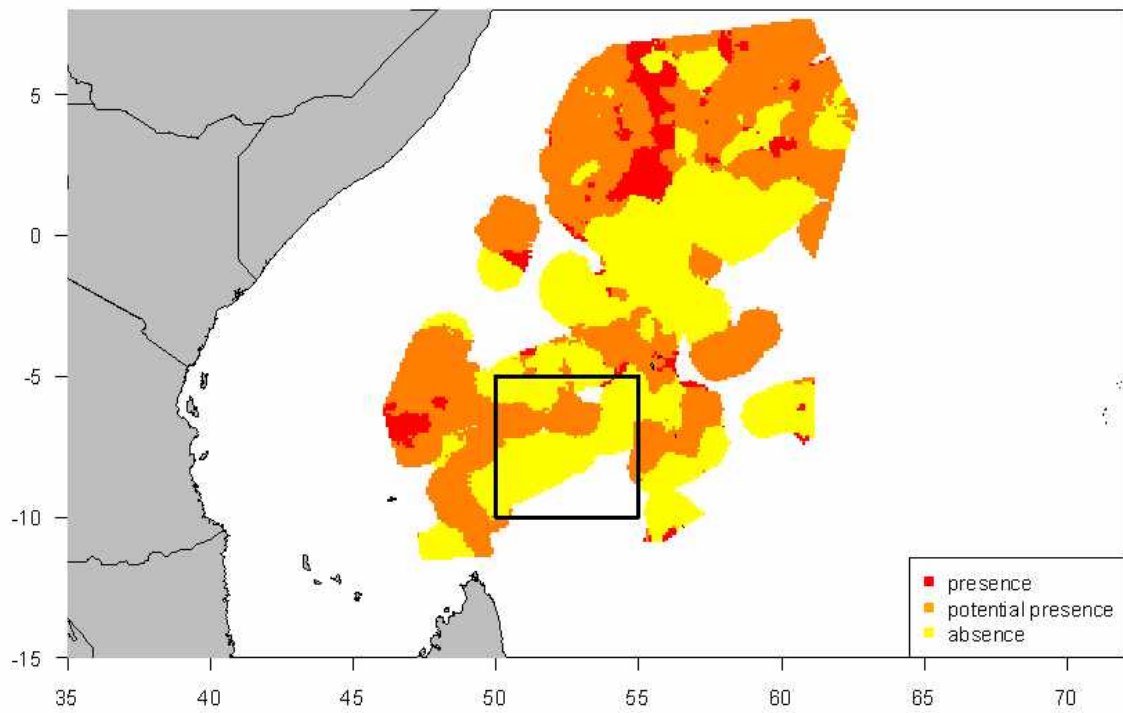


5/2008

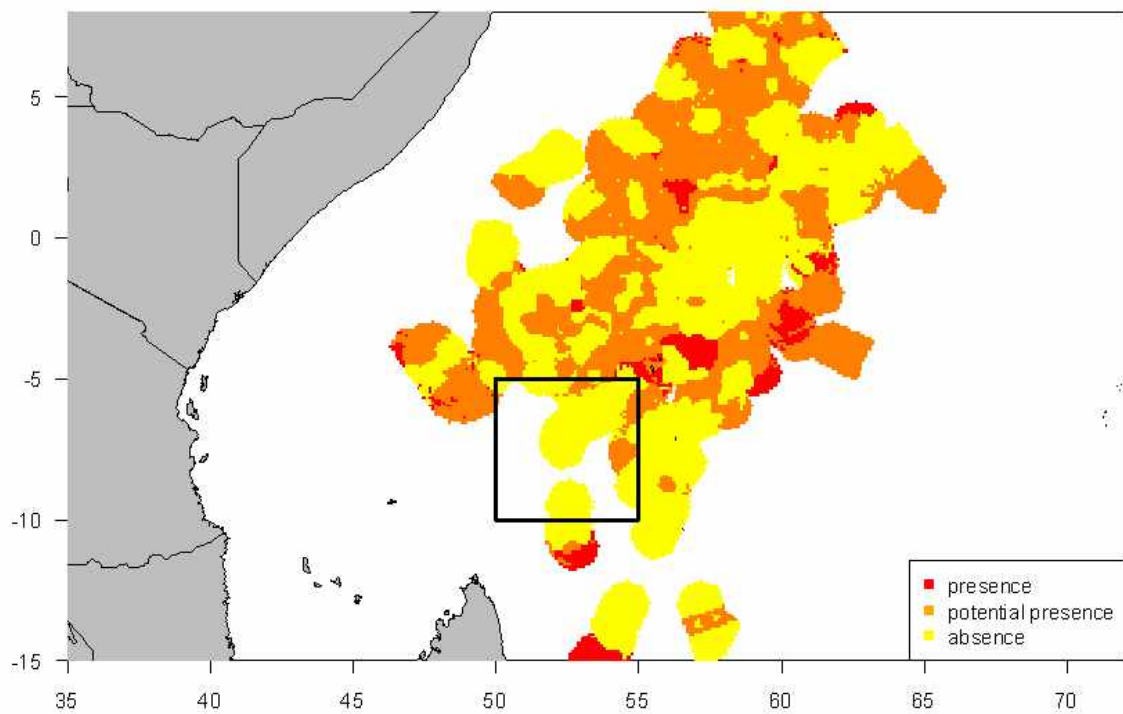


6/2008

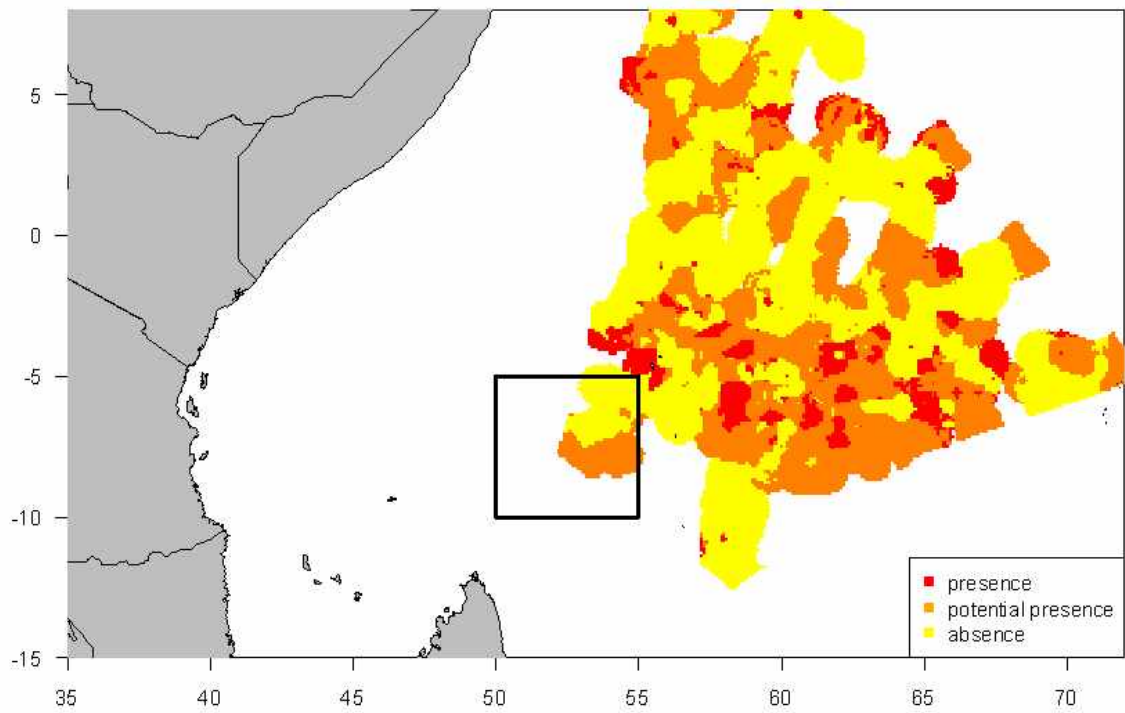




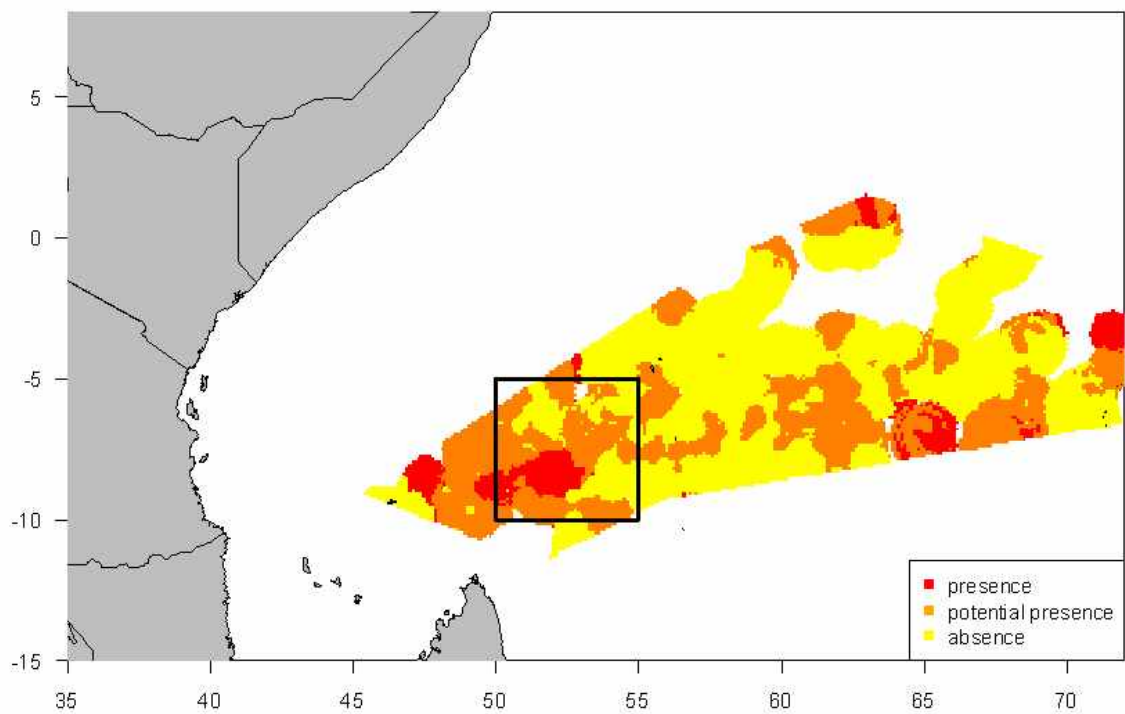
9/2008



10/2008



11/2008



12/2008





## De la trajectoire des prédateurs à la cartographie de leurs proies

### *Estimation spatiale de l'activité des senneurs et des thonidés dans l'Océan Indien.*

#### **RESUME :**

Actuellement, la distribution spatiale des thons tropicaux pêchés par les senneurs français dans l'Océan Indien est représentée à partir des données de captures et d'effort issues des livres de bord. Or ces données ne comportent qu'une position par jour et le nombre de calées réalisées pendant cette journée : l'ensemble des zones prospectées sans action de pêche, synonyme d'absence d'aggrégations de thon n'est pas connu. Ces zones seraient pourtant utiles à la cartographie des abondances. Cette flottille étant équipée de systèmes VMS (Vessel Monitoring Systems), les trajectoires données par les VMS sont utilisées pour déduire du comportement des navires, les zones de présence (pêche) et d'absence (non pêche) d'aggrégations de thonidés. L'objectif est donc d'estimer l'activité d'un navire à partir de sa trajectoire.

L'application d'un modèle markovien permet de distinguer les activités de route, de recherche, et d'arrêt, et de pêche. Pour la majorité des sorties en mer (exceptées celles où un observateur est à bord), l'activité réelle du navire n'est pas connue (variable latente), ce qui justifie l'approche par chaînes de Markov à états cachés. Le modèle a été développé dans un contexte bayésien incluant des priors sur certains des paramètres (vitesses, angles de changement de cap et matrice de transition). Il a été calibré et validé grâce aux données collectées par des observateurs embarqués sur 10% de la flottille. Le taux d'erreur est de 10% pour des positions VMS enregistrées toutes les heures. Une fois estimée, l'activité des senneurs en chaque point de leur trajectoire a permis (1) d'obtenir des indicateurs spatiaux et temporels de l'effort de la flottille de senneurs français, et (2) d'étudier la structure spatiale des zones de présence de bancs de thons (variogrammes d'indicatrices) et d'en déduire, par cokrigage d'indicatrices, des cartes de présence/présence potentielle/absence de thon capturable, pouvant être interprétées comme indices d'abondance de thon.

#### **Mots clés :**

Thon, effort de pêche, abondance, trajectoire, cokrigage d'indicatrices, Vessel Monitoring Systems (VMS), modèle à espaces d'états markoviens cachés, Bayes, Océan Indien, observateurs, thonier senneur.

## From predators trajectories to preys maps

### *Spatial estimation of purse-seiners activity and tuna in the Indian Ocean*

#### **ABSTRACT:**

Nowadays spatial distribution of tropical tuna fished by the French purse-seiners in the Indian Ocean is represented with catch and effort data from logbooks. However, these data provided only one position per day and the number of fishing sets during each day: the prospected areas without any set, synonym of absence of tuna aggregations, were not known. These areas are essential to map the tuna abundances. The French purse-seiners fleet is equipped with Vessel Monitoring Systems (VMS). Trajectories obtained by the VMS were used to deduce vessels behaviour, and thus, presence (fishing) and absence (non fishing) of tuna aggregations. The objective is thus to estimate the vessel activity from its trajectory.

The application of a state-space model allowed to distinguish "cruising", "tracking", "stopping", and "fishing" activities. For the majority of surveys (except those with an observer), the real activity of the vessel was not known (latent variable), which justified the modelling with a Hidden Markov model. The model was run in a Bayesian framework including prior knowledge on some parameters (speed, turning angle and transition matrix). This model was calibrated and validated thanks to observers data on 10% of the fleet. The error rate was of 10% for VMS positions data recorded every hour. After the estimation of the states, the purse-seiners activities (cruising/tracking/stop/fishing) allowed to (1) improve spatial and temporal indices of the effort of French purse-seiners, and (2) study the spatial structure of tuna presence areas (indicators variograms), and to deduce maps of tuna presence/potential presence/absence by indicators cokriging, that can be interpreted as an abundance proxy.

#### **Keywords :**

Tuna, fishing effort, abundance, trajectory, indicator cokriging, Vessel Monitoring Systems (VMS), Bayes, Hidden Markov state-space model, Indian Ocean, observers, purse-seiner.

